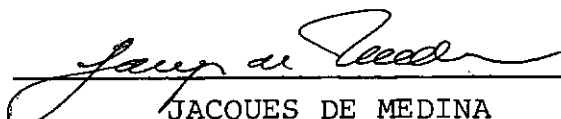


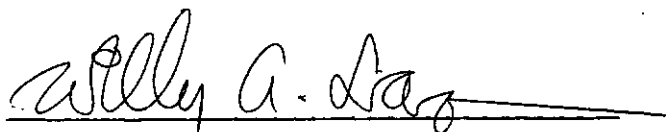
ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO ARGILOSO COM CAL DE CARBURETO

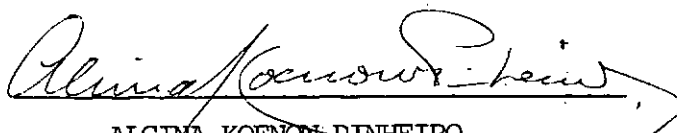
- Humberto Felix Borges

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE  
PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE  
JANEIRO, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO  
DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIA (M.Sc.)

Aprovada por:

  
JACQUES DE MEDINA  
(orientador)

  
WILLY ALVARENGA LACERDA

  
ALCINA KOENOW PINHEIRO

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

FEVEREIRO DE 1979

À minha mãe, irmãos,  
sobrinhos e à memória  
do meu pai.

AGRADECIMENTOS

- Ao professor Jacques de Medina pela dedicada orientação durante toda a elaboração desta Tese.
- A todos os funcionários da COPPE pelo auxílio direto ou indireto.
- Ao FINEP pela ajuda financeira.
- Ao colega e amigo Roberto Nogueira de Souza pelo incentivo e revisão literária.

SINOPSE

Este trabalho tem como objetivo verificar o comportamento da cal de carbureto como estabilizante de uma argila caolinítica.

Em paralelo, foi feito um estudo comparativo entre os efeitos da cal de carbureto e de uma cal calcítica hidratada comercial comum sobre esse mesmo solo.

As etapas deste trabalho consistiram de:

- Análise da cal de carbureto, da cal calcítica e do solo.
- Efeitos da cal de carbureto e da cal calcítica, ambas em diversas proporções, sobre o solo.
- Conclusões.

ABSTRACT

The purpose of this research work was to verify the behavior of the waste lime in stabilization of a kaolinitic clay.

Parallel to this, a comparative study was done between the effects of the waste lime and the effects of a calcitic hidrated lime on this soil.

The steps of this research work consisted of:

- Analysis of the waste lime, of the calcitic lime, and analysis of the soil.
- The effects of the waste lime and the effects of calcitic lime, in varied proportions, in stabilization of this soil.
- Conclusions.

## ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO ARGILOSO COM CAL DE CARBURETO

## ÍNDICE

I	-	Introdução -----	1
II	-	Capítulo I - Reações Químicas do Solo-Cal -----	3
III	-	Capítulo II - Cal de Carbureto -----	6
IV	-	Capítulo III - Cal Calcítica -----	10
V	-	Capítulo IV - O Solo -----	14
VI	-	Capítulo V - Raios X -----	17
VII	-	Capítulo VI - Teor mínimo de cal para uma estabilização ótima do solo -----	19
VIII	-	Capítulo VII - Limites de Atterberg -----	25
IX	-	Capítulo VIII - Contração Linear e Limite de contração volumétrica -----	30
X	-	Capítulo IX - Expansibilidade -----	39
XI	-	Capítulo X - Compactação -----	48
XII	-	Capítulo XI - Índice de Suporte Califórnia -----	57
XIII	-	Capítulo XII - Resistência à compressão não confinada -----	65

VX	-	Capítulo XIII- Ensaio de compressão Triaxial -----	82
XV	-	Capítulo VX - Propriedades do Solo-cal de carbureto e do solo- cal calcítica, nos teores mínimos, para um estabilização ótima -----	92
XVI	-	Bibliografia -----	95

## I - Introdução

Os engenheiros rodoviários têm-se deparado com os mais diversos tipos de solos nas suas construções. Alguns desses solos não satisfazem a todas as especificações para o seu emprego, sendo necessária a substituição desse material por outro com propriedades adequadas, ou então a realização de um beneficiamento desse solo, com a finalidade de melhorar as suas características mecânicas.

Um dos beneficiamentos já aprovados para solos argilosos é a sua estabilização com a cal.

Neste trabalho procurou-se estabilizar uma argila caolinítica com uma cal de carbureto, que é um subproduto industrial da fabricação do acetileno e, portanto, um material economicamente viável, além de se aproveitar um resíduo industrial que, atualmente, constitui um sério problema para as sociedades industrializadas.

Analisando-se a produção, no Brasil, da cal de carbureto, quadro II, conclui-se que esta existe em quantidade suficiente para aplicação em trechos rodoviários que não sejam longos, estradas vicinais, acostamentos e ruas. Quanto a aplicabilidade técnica, pode-se concluir, com este estudo, que a cal de carbureto pode ser utilizada para melhoramentos do subleito, sub-base e até base de pavimentos rodoviários para tráfego leve.



Uma ressalva a se fazer na utilização dessa cal é o seu emprego, logo após a sua chegada nos depósitos-tanques, evitando-se, assim, a recarbonatação.

## CAPÍTULO I

### REAÇÕES QUÍMICAS DO SOLO - CAL

Diversos tipos de cal têm sido utilizadas como eficientes estabilizantes de solos finos, incluindo produtos a vários graus de impureza. Sendo a cal calcítica  $\{Ca(OH)_2\}$  e a cal dolomítica  $\{Ca(OH)_2, MgO\}$ , as mais utilizadas. A cal virgem  $\{CaO\}$ , apesar de sua alta reatividade com as partículas de sílica e alumina apresenta desvantagens por sua natureza cáustica, que causam problemas de manuseio, estocagem e corrosão de equipamentos.

Outro tipo de estabilizante que se procura utilizar é a cal de carbureto, ou borra de carbureto, refugo industrial, proveniente da fabricação do gás acetileno, que constitui o tema deste trabalho.

O objetivo do uso da cal na engenharia rodoviária é modificar as propriedades do solo do sub-leito, da sub-base ou da base de um pavimento, no que diz respeito à sua resistência e trabalhabilidade.

Quando a cal é misturada ao solo fino em presença da água, ocorrem diversas reações entre alguns de seus compostos constituintes, algumas imediatas outras mais lentas.

A troca catiônica e a floculação são reações que

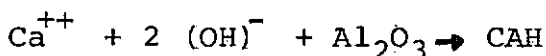
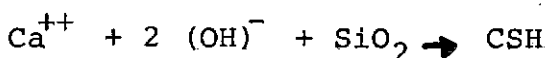
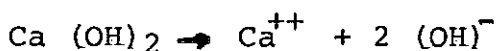
ocorrem rapidamente, modificando a estrutura do solo, tornando-o mais trabalhável, e também dando um pequeno acréscimo à sua resistência.

Segundo Herzog e Mitchell (2), a floculação ocorre devido à alta concentração eletrolítica, na água intersticial da solução solo-cal-água e como uma consequência da troca catiônica.

Diamond e Kinter (3) defendem a hipótese de que é significativa a influência da rápida formação de aluminatos de cálcio hidratados, como materiais cimentantes, no desenvolvimento da floculação.

As reações pozolânicas que ocorrem entre a cal, a sílica, a alumina e a água se processam lentamente.

Quando a cal é adicionada ao solo, o pH da mistura cresce até valores próximos a 12,4, o que segundo Eades (4), causa a dissolução da sílica e da alumina, dos argilo-minerais, que são reativas com a  $\text{Ca}^{++}$ . Essas reações ocorrem enquanto houver disponibilidade de reagentes, de acordo com o esquema simplificado abaixo

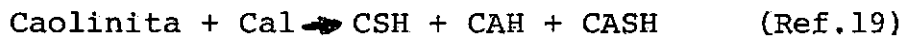


Numa mistura de solo-cal pode ocorrer uma grande

variedade de reações químicas, a depender das características do solo, do tipo de cal usada, do tempo, da temperatura, e das demais condições de cura.

As principais características de um solo que influenciam a sua reatividade com a cal são: o seu pH, presença de matéria orgânica, relação sílica - sesquióxidos, sílica-alumina e grau de intemperismo.

Reações típicas da caolinita com a cal calcítica são:



ou



Sendo: C = CaO

S = SiO<sub>2</sub>

A = Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

H = H<sub>2</sub>O.

Outra reação que pode ocorrer, numa mistura de solo-cal, é uma carbonatação da cal, o que é indesejável, por torná-la ineficaz como estabilizante, passando a funcionar apenas como filler.

## CAPÍTULO II

### CAL DE CARBURETO

A cal de carbureto, ou borra de carbureto, é um rejeito industrial do gás acetileno, proveniente da hidratação do carbureto de cálcio, de cor acinzentada devido às impurezas do carvão utilizado na calcinação do calcário e produção de carbureto, sendo que o seu processo de fabricação pode ser por via úmida ou por via seca.

A cal de carbureto utilizada nesta pesquisa foi produzida por via úmida e colhida em tanques-depósitos de fundo filtrante, onde fica armazenada após a saída das unidades produtoras até posterior remoção.

Segundo estudos elaborados pela National Lime Association (1) a cal de carbureto é de qualidade inferior à cal calcítica, tanto química como fisicamente, além de se notar uma certa heterogeneidade entre as cals de carbureto produzidas em diversas plantas.

Entre as desvantagens físicas pode-se citar o maior diâmetro das partículas, o que diminui a sua reatividade, e aumenta a sua velocidade de deposição, quando dispersa em um meio líquido. Como se pode verificar na TAB.3.2, a cal de carbureto apresenta uma velocidade de deposição 8 vezes maior que a cal calcítica.

A principal desvantagem química da cal de carbureto, em relação à cal calcítica comercial, é o seu menor teor de  $\text{CaO}$ , como se pode verificar na TAB.3.1, sendo que a cal de carbureto, produzida por via úmida, está mais sujeita à carbonatação que a produzida por via seca.

Outra desvantagem apresentada pela cal de carbureto produzida por via úmida é que deverá ser misturada ao solo escarificado como lama de cal, através de caminhões-tanques munidos de barra espargidora e bomba de recirculação, podendo assim dificultar o seu transporte e, além disso, a suspensão da lama de cal tem um limite máximo igual a 40%, a partir da qual se torna difícil o seu bombeamento através das barras espargidoras.

O emprego da cal de carbureto se apoia, então, na vantagem econômica para obras não muito distantes das unidades produtoras e na necessidade de aproveitamento dos rejeitos industriais, podendo ser empregada para melhoria do sub-leito, estabilização de sub-bases, e até bases de estradas de tráfego leve, além de acostamentos e obras de manutenção.

Deve-se ter em mente que a produção de cal de carbureto nas diversas plantas, como nos mostra o quadro I, está numa ordem de grandeza equivalente à demanda para obras municipais e estaduais.

Segundo correspondência da National Lime Association, através do seu diretor executivo Robert S. Boynton - Prof. Jacques de Medina (COPPE-UFRJ), a cal de carbureto tem

sido largamente empregada nos E.U.A., com razoável sucesso, sendo que algumas das cals de carbureto produzidas por via seca são quase tão puras quanto as cals hidratadas comerciais e funcionam muito bem se 1 a 2% de cal extra é acrescentada. E se empenham contra o uso da cal de carbureto produzida por via úmidas e depositadas durante anos, devido ao seu elevado grau de carbonatação.

QUADRO II

PRODUÇÕES DE BÔRRA ATUAIS: 09/79			
DIVISÃO/USINA	BÔRRA ÚMIDA (9.4% SÓLIDOS)	BÔRRA (50% DE SÓLIDOS)	BORRA SECA
<u>Sul:</u>			
Sapucaia do Sul	1.314.000	245.280	122.600
Curitiba	1.050.000	196.000	98.000
<u>Norte:</u>			
Belém	205.800	38.400	19.200
Fortaleza	243.600	45.400	22.700
Maceió	266.100	49.600	24.800
Jaboatão	705.000	131.600	65.800
<u>São Paulo:</u>			
Diadema	5.186.000	968.000	484.000
Campinas	2.388.900	445.920	222.960
São Carlos	963.300	179.800	89.900
Ilha Solteira	308.700	57.600	28.800
Baurú	738.240	137.800	68.900
Mogi das Cruzes	1.957.200	365.300	182.600
Londrina	547.500	102.200	51.100
Uberlândia	392.600	73.280	36.600
<u>Centro:</u>			
Cachambi (R.J)	2.180.900	407.100	203.550
Vitória	767.800	143.330	71.660
Belo Horizonte	1.210.700	226.000	112.990
Opatinga	567.200	105.880	52.940
Salvador	915.120	170.800	85.400
Pombal	-	-	-



CAPÍTULO IIICAL CALCÍTICA

A cal calcítica comercial utilizada para o estudo de estabilização do solo tem a sua composição química exposta na TAB. 3.1, e suas propriedades físicas, na TAB. 3.2.

Foi realizado o ensaio de sedimentação para a cal calcítica, com a finalidade de se observar a velocidade de deposição de suas partículas, na água, e verificou-se que essa velocidade é equivalente a dos grãos de um solo siltoso, cuja análise granulométrica se encontra na figura 3.1 e TAB. 3.3.

TABELA 3.1

	CAL DE CARBURETO	CAL HIDRATADA COMERCIAL
Ca (OH) <sub>2</sub>	43,9%	74,0%
Ca O	18,5%	19,0%
Ca CO <sub>3</sub>	34,8%	7,6%
Mat. Inf.	2,6%	0,0%

Composição Química da cal de carbureto (seca) e da cal calcítica hidratada comercial.

TABELA 3.2 - Propriedades típicas da cal de carbureto e da cal calcítica.

	CAL DE CARBURETO	CAL CALCÍTICA
Peso Específico Real ( $\text{g/cm}^3$ )	2,36	2,65
Velocidade de Deposição: Tempo para 1/vol	5 min	40 min

TABELA 3.3 - Granulometria da cal de carbureto e da cal calcítica, correspondente à granulometria do solo.

PERCENTAGENS	CAL DE CARBURETO	CAL CALCÍTICA
ARGILA	4,0	7,0
SILTE	76,0	72,0
AREIA	20,0	21,0

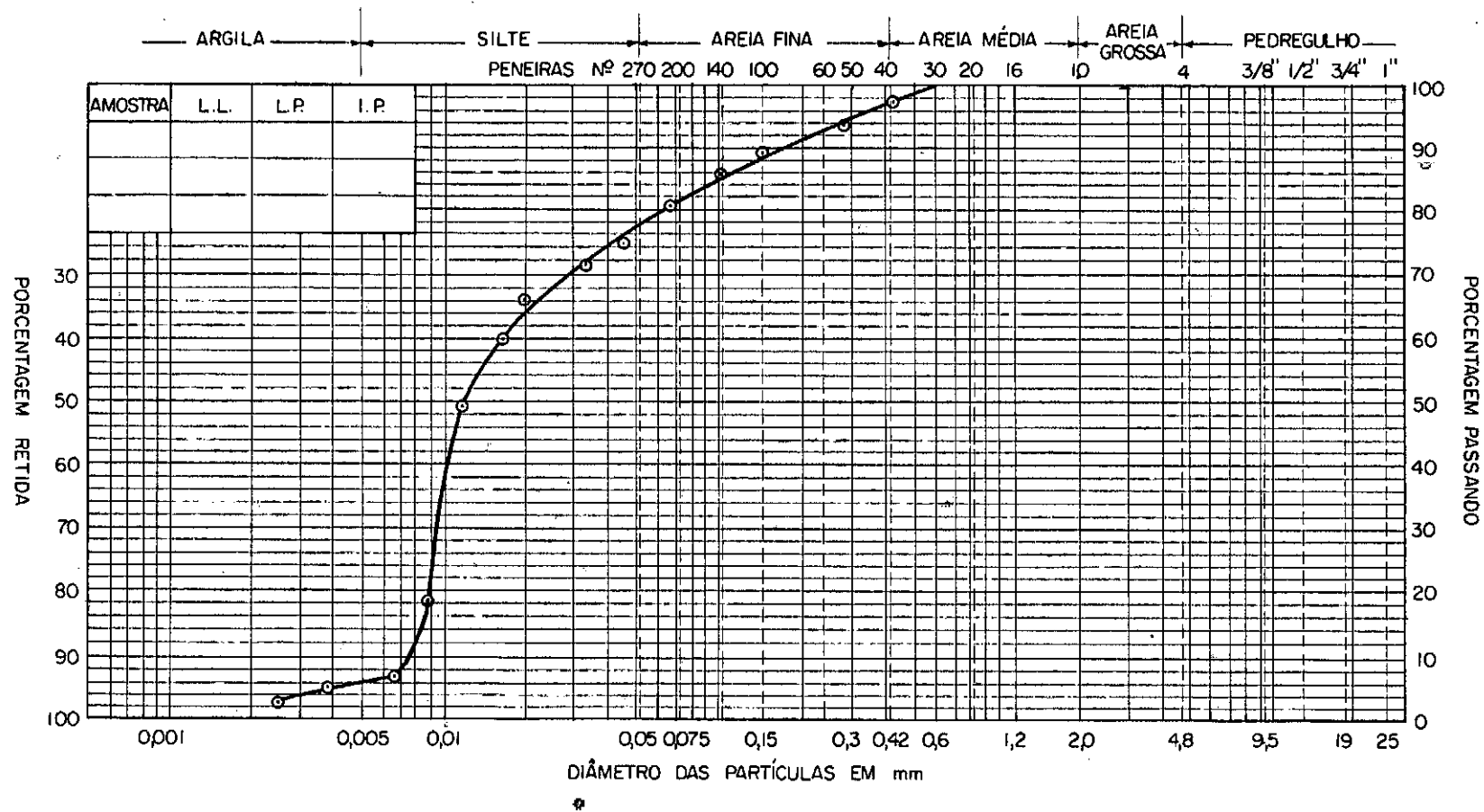


FIG. 3.1 — Curva granulométrica da cal calcífica

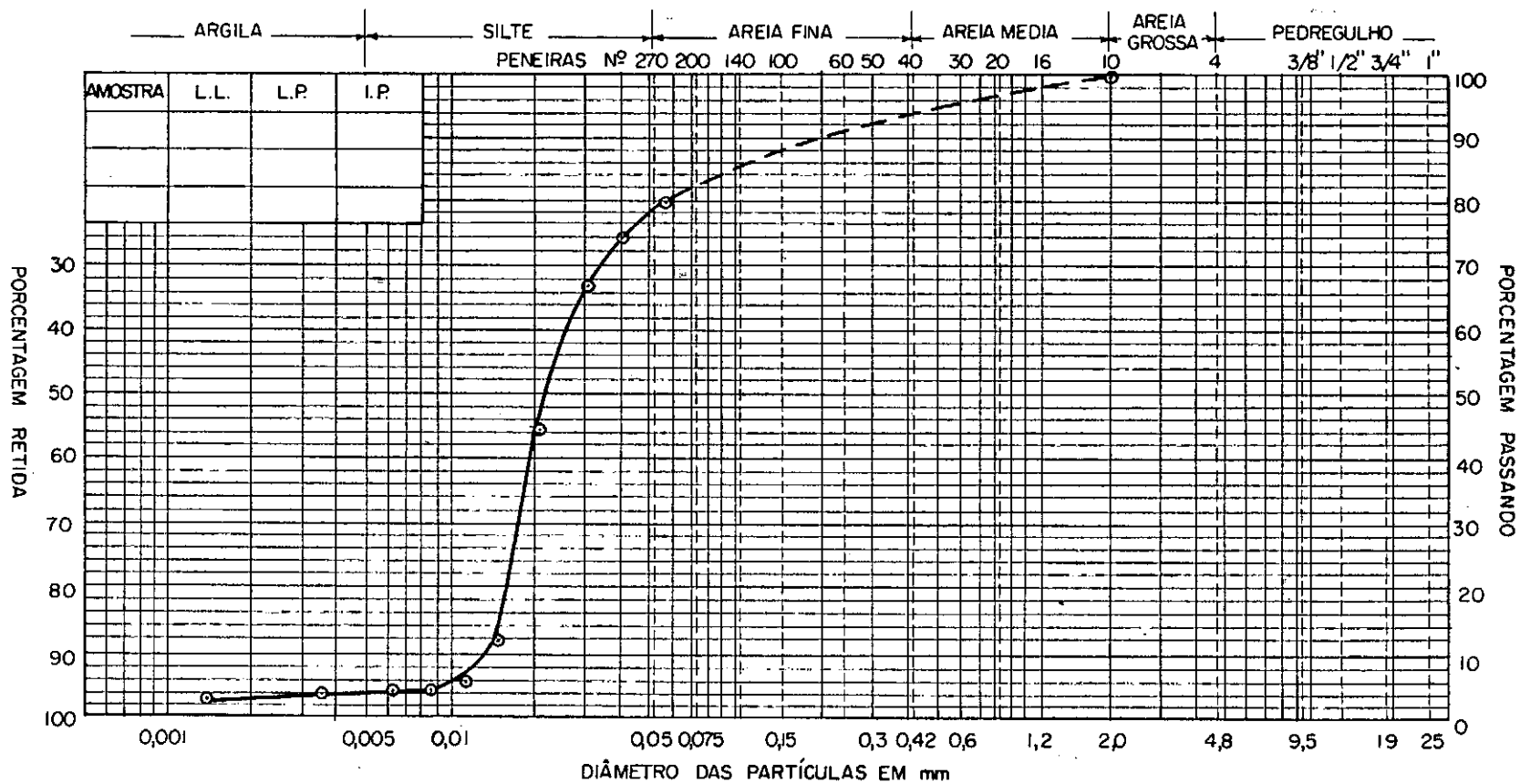


FIG. 3.2 — Curva granulométrica da cal de carbureto

CAPÍTULO IVO SOLO

O solo escolhido para esta pesquisa foi extraído a 1,0 m de profundidade, na rua São Gonçalo, bifurcação com Rio Grande, no bairro de Jacarepaguã, Rio de Janeiro, onde se pretendia construir um trecho experimental estabilizado com a cal de carbureto.

O solo em estudo é uma argila caolinita; ( $d=7,1^{\circ}A$ ), como se pode verificar pela análise termo-diferencial e pela difração com raios X.

Na TAB. 4.1 e figura 4.1, encontra-se a análise granulométrica do solo; na TAB. 4.2, as suas propriedades físicas e químicas; na TAB. 3.1 a sua composição química, e na TAB. 4.3, a sua classificação e composição mineralógica.

TABELA 4.1 - Composição Granulométrica do Solo; Peneiramento e Sedimentação.

SOLO	(%)
Areia	34
Silte	8
Argila	58

TABELA 4.2 -Propriedades Físicas e Químicas do Solo.

	$\gamma_{\text{Real}}$	L.L.	L.P.	I.P.	I.G.	L.C.	CL	I.Askempton	E <sub>INEC</sub>	pH	Mat.Org.
SOLO	2,73	58,60	31,96	26,64	15	25	13	0,44	8,7	4,2	0,0

TABELA 4.3 - Classificação e Composição Mineral do Solo.

Classificação	
H.R.B.	A-7-5
U.S.C.	C.H
Argilo-Mineral Predominante	Caolinita

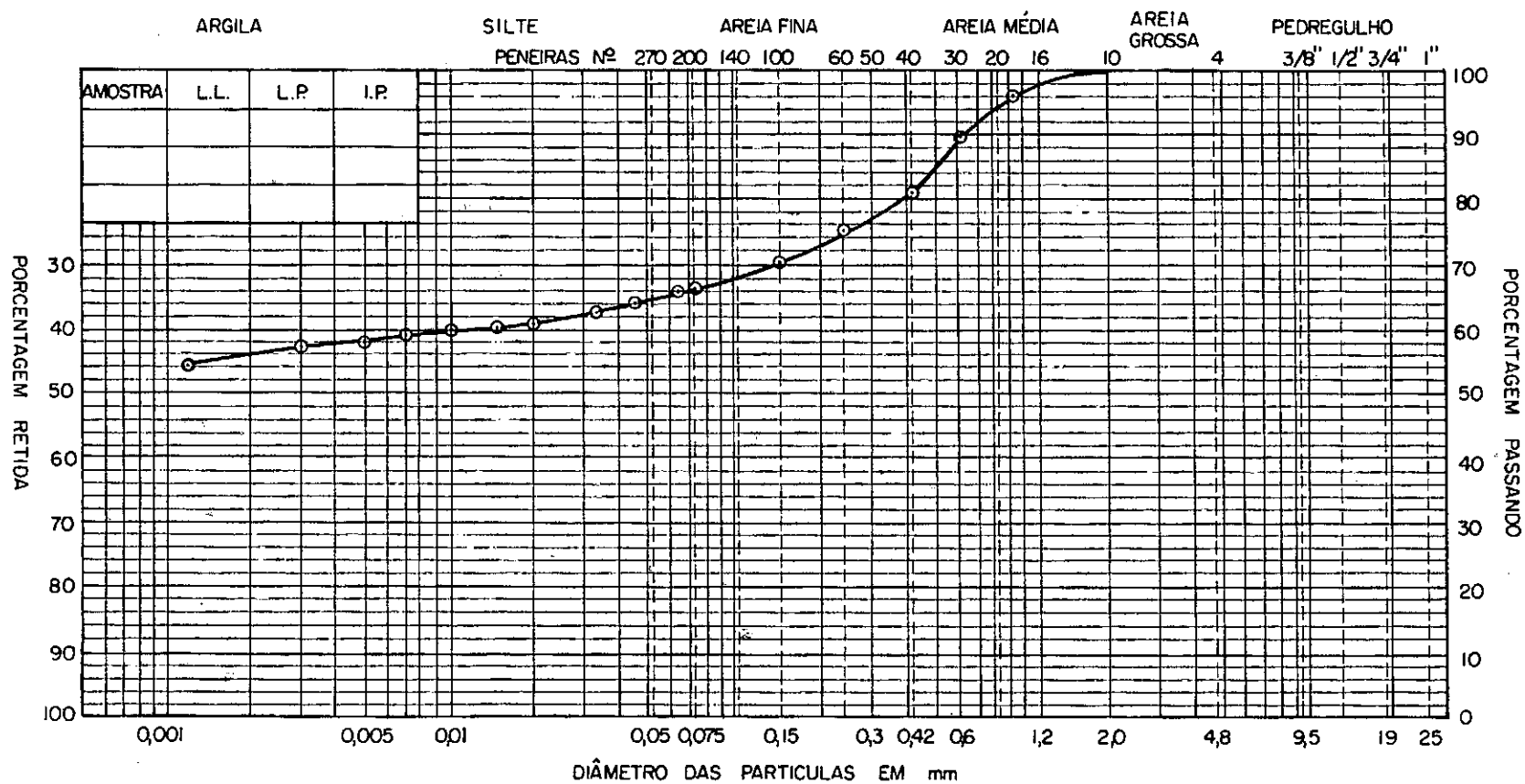


FIG. 4.1 — Análise granulométrica

CAPÍTULO VRAIOS X

Com a finalidade de se determinar a composição mineral do solo, em estudo, e a influência química da cal de carbureto sobre o mesmo, foram realizadas análises com raios X, em amostras de solo puro e de solo-cal de carbureto, a percentagens iguais a 2, 5 e 10, em relação ao peso do solo seco, com o difratômetro de raios X, marca Phillips, do Programa de Engenharia Metalúrgica e Materiais, COPPE-UFRJ.

O solo e a cal de carbureto foram misturados na umidade ótima, correspondente a cada percentagem de cal usada, e as amostras permaneceram em cura, na câmara úmida, envoltas em papel de alumínio, durante 10 dias, após a qual eram passadas na peneira 300 mm e analisadas sob as seguintes condições:

Radiação CuK

Velocidade do goniômetro  $2^{\circ}/\text{min.}$

Velocidade do papel 1.200 mm/hora



CONCLUSÃO

Analisando-se os difratogramas obtidos para o solo puro, observa-se que para  $2\theta$  igual a  $12^\circ$ , ocorre um pico característico da caolinita ( $d = 7,1^\circ\text{\AA}$ ), confirmando-se assim os resultados da análise termo-diferencial, podendo-se observar, também, que não existem sinais de quartzo ou gibsita

Apesar dos ensaios de caracterização e resistência do solo-cal de carbureto apresentarem resultados conclusivos, quanto à efetividade dessa cal como estabilizante, a única diferença observada entre os difratogramas obtidos com o solo puro e com o solo-cal, a uma cura de 10 dias, foi um abaixamento no pico característico da caolinita.

CAPÍTULO VITEOR MÍNIMO DE CAL PARA UMAESTABILIZAÇÃO ÓTIMA DO SOLO

O teor de cal, necessário para uma estabilização ótima do solo, foi encontrado para a cal de carbureto e cal calcítica hidratada pelo método de Eades e Grim (5), medindo-se o valor do pH da solução solo-cal-água destilada, estando ambas as cals nas percentagens de 1 a 6, em relação ao peso do solo seco.

Foram colocadas 20g de uma amostra representativa do solo seco ao ar, passando nas malhas da peneira nº40 (0,042, mm), em recipientes de vidro e, a cada recipiente, foi adicionada a cal nas quantidades acima referidas.

Em seguida, foram acrescentados, a cada recipiente, 100 ml de água destilada, fechando-se os mesmos hermeticamente, agitando-os durante aproximadamente 30 segundos, até que não houvesse nenhum material depositado no fundo.

Cada recipiente era novamente agitado durante 30 segundos, em intervalos de 10 minutos.

Após uma hora, transferiu-se parte da pasta dos recipientes para beakers plásticos, medindo-se, então, o pH de cada solução, num potenciômetro "Corning" Modelo 10, munido de eletrodos da mesma marca.

A percentagem ótima de cal para a modificação ôtima do solo é a correspondente a um pH igual a 12,4.

TABELA 6.1 - Variação do pH do solo com o teor cal usada; pH do solo, cal calcítica e cal de carbureto.

% CAL	VALORES DO pH		
	CAL CARBURETO	CAL CALCÍTICA	SOLO-PURO
1	10,73	11,85	-
2	11,47	12,50	-
3	12,30	12,55	-
4	12,40	12,55	-
5	12,43	12,60	-
6	12,43	12,60	-
CAL CALCÍTICA PURA	-	12,70	-
CAL CARBURETO PURA	12,50	-	-
SOLO-PURO	-	-	4,2

TABELA 6.2 - Percentagem de cal para se obter uma Estabilização ótima do solo; segundo o método de Eades e Grim.

TIPO DE CAL	PERCENTAGENS DE CAL
CAL CARBURETO	4
CAL CALCÍTICA H.	2

TABELA 6.3 - Percentagens de cal de carbureto e de cal calcítica comercial para a modificação ótima e estabilização ótima do solo, e as respectivas variações em percentagem, para o IP e CBR, em relação aos valores obtidos para o solo puro.

TIPO DE CAL	CRITÉRIO DE MARKS E HALIBURTON	% DE CAL	VARIAÇÕES PERCENTUAIS	
			I.P.	CBR
CAL DE CARBURETO	Modificação ótima	4	21	77
	Estabilização ótima	8	30	155
CAL CALCÍ-TICA	Modificação ótima	2	21	200
	Estabilização ótima	4	25	311

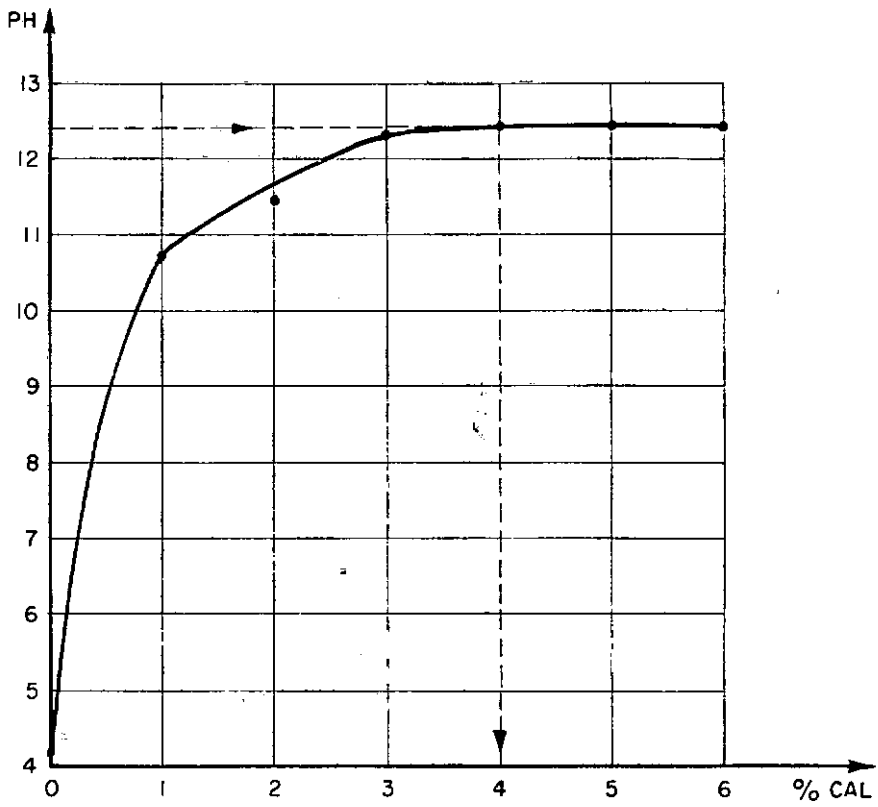


FIG. 6.1 — Relação entre o valor do PH do solo e o teor de cal de carbureto

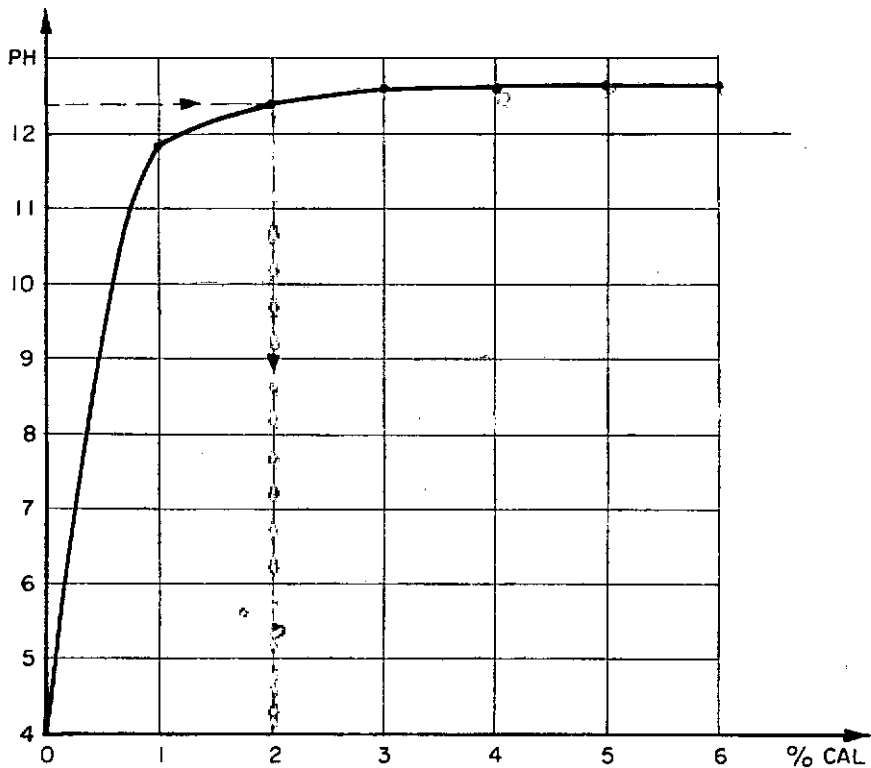


FIG. 6.2 — Relação entre o valor do PH do solo e o teor de cal calcítica hidratada

### CONCLUSÃO

Segundo Eades e Grim (5), a quantidade de cal para a estabilização ótima de um solo é a mínima quantidade necessária, para que ocorram as reações rápidas entre o solo e a cal, ou seja, a floculação e a permuta catiônica, em menos de uma hora. Esse melhoramento do solo refere-se a uma melhor característica de trabalhabilidade do mesmo e a um pequeno acrêscimo de resistência. (Ref. 5, 6 e 7).

Marks e Haliburton (8), e Drake e Haliburton (9), desenvolvendo estudos de solo-cal em solos coesivos de Oklahoma, referem-se à percentagem mínima de cal para a estabilização ótima de um solo, como aquela necessária e suficiente para que o solo apresente um acrêscimo substancial de resistência, após 28 dias de cura, e denominam de modificação ótima do solo, quando este somente apresenta boas condições de trabalhabilidade.

Para os solos coesivos estudados, Marks e Haliburton determinaram que a quantidade mínima de cal, para uma estabilização ótima, seria o dobro da quantidade mínima necessária para uma modificação ótima, determinada pelo método de Eades e Grim (5).

Para o solo-cal de carbureto e solo-cal calcítica, em estudo, os valores dos pH encontrados para cada solução se encontram na TAB. 6.1. Nas figuras 6.1 e 6.2, estão traçadas as curvas que relacionam o valor do pH e a percentagem de cal. Na TAB. 6.2, constam as percentagens de cal para a estabi-

lização ótima, determinadas pelo método de Eades e Grim.

Na TAB. 6.3, se encontram as percentagens de cal de carbureto e de cal calcítica, necessárias para a modificação ótima e estabilização ótima, segundo Marks e Haliburton, e os acréscimos em percentagem, obtidos para o índice de plasticidade e C.B.R., para os teores de cal mencionados, em relação aos valores obtidos para o solo puro.

CAPÍTULO VIILIMITES DE ATTERBERG

Com amostras obtidas, de acordo com o item 6.b, do método de "Preparação de amostras de solo para ensaios de caracterização", realizaram-se ensaios para a determinação do Limite de Liquidez e do Limite de Plasticidade do solo puro, do solo-cal de carbureto e do solo-cal calcítica hidratada, ambas nas percentagens de 2, 4, 6 e 8, em relação ao peso do solo seco. E com uma proporção fixa igual a 6%, para ambas as cais, verificou-se a variação desses limites para diferentes tempos de cura.

À mistura de solo-cal era adicionada água destilada, em quantidade suficiente para se obter uma massa plástica, procurando-se conservar a mesma umidade em todas as misturas ensaiadas.

A seguir, as misturas obtidas eram deixadas em cura, durante 2 horas, 24 horas e 48 horas, à uma temperatura igual a  $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ , completamente envoltas em papel de alumínio.

A partir de então, os Limites de Liquidez e de Plasticidade eram determinados, de acordo com o MB-30 e MB-31 ABNT, respectivamente.



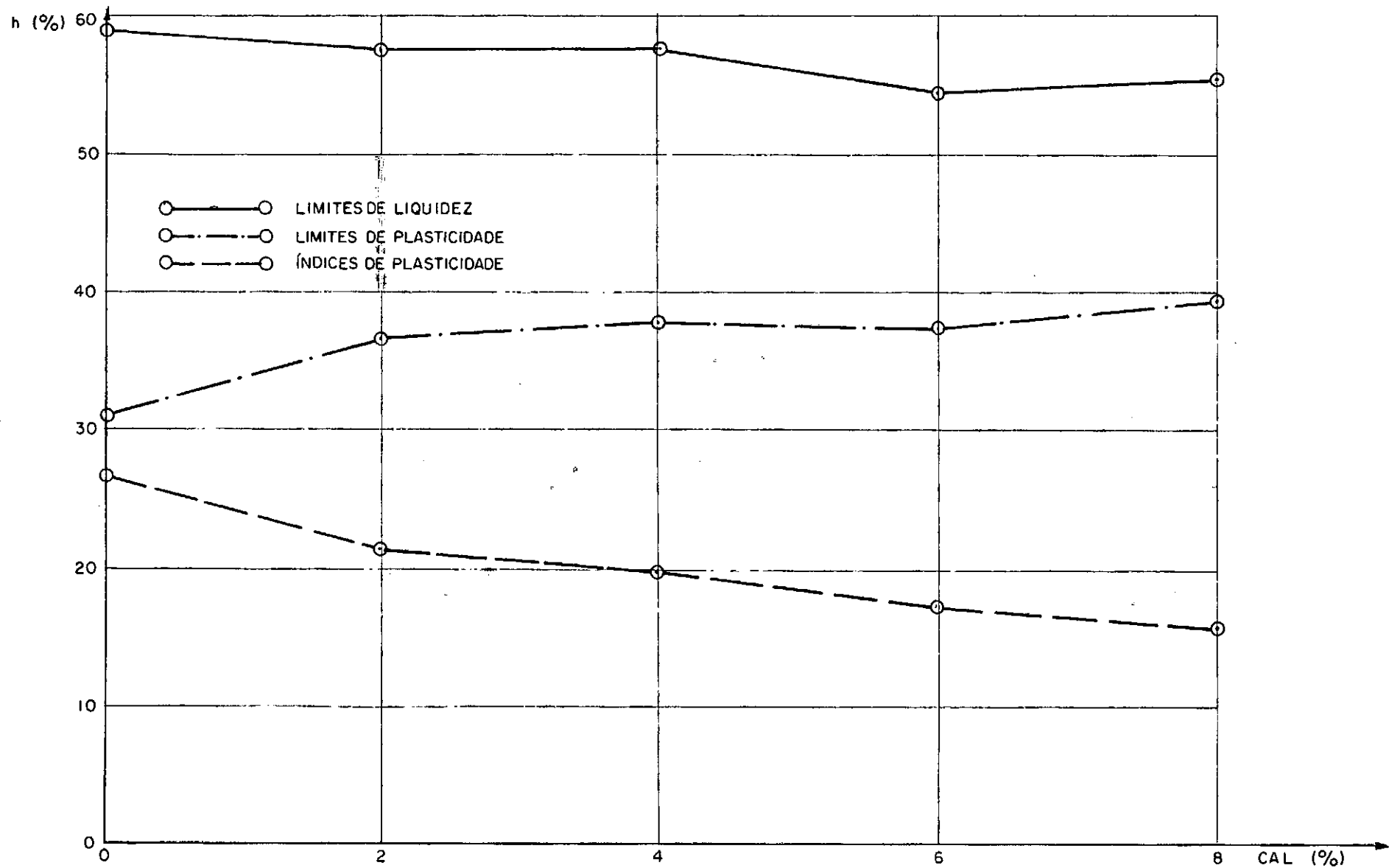


FIG.7.1 —Variação dos limites de Atterberg para solo-cal calcílica, a 0%, 2%, 4%, 6% e 8%, em relação ao peso do solo seco, a um tempo de cura de 2 horas

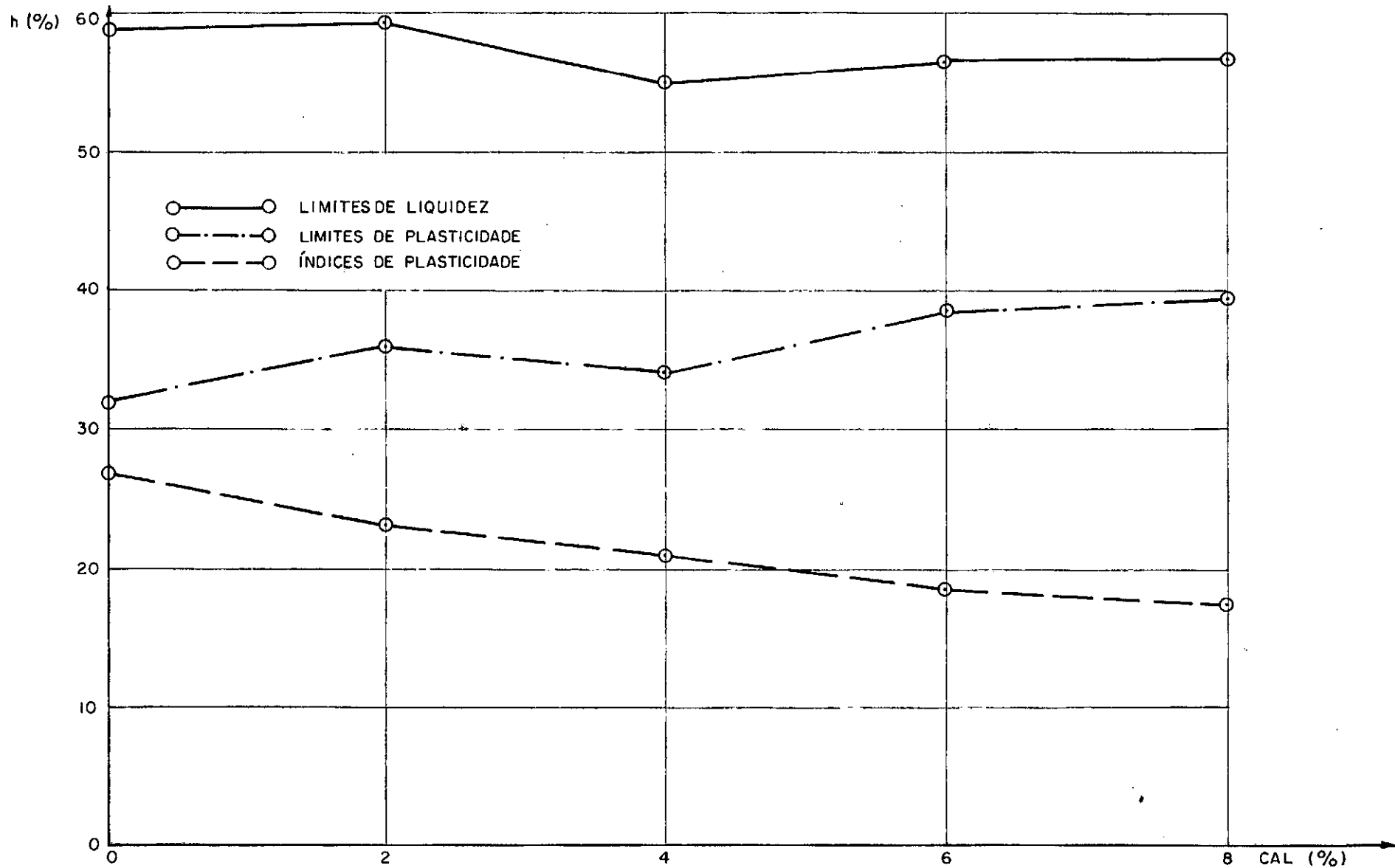


FIG.7.2 —Variação dos limites de Atterberg p/ solo puro e solo-cal de carbureto, a 2%, 4%, 6% e 8%, em relação ao peso de solo seco, a um tempo de cura igual a 2 horas

### CONCLUSÃO

Analisando-se os valores encontrados para os Limites de Atterberg, TAB. 7.1, verifica-se que há uma diminuição do índice de plasticidade, à medida que se aumenta a percentagem de cal usada, sendo esse decréscimo maior para o solo-cal calcítica do que para o solo-cal de carbureto.

A diminuição do índice de plasticidade, que não é tão grande, como no caso da argila montmorilonítica-cal calcítica, ocorre devido a um aumento gradual do Limite de Plasticidade e a uma diminuição do Limite de Liquidez, como se pode verificar nas figuras 7.1 e 7.2.

Observa-se, também, que o índice de plasticidade decresce com o aumento do tempo de cura usado, conforme se verifica pelos valores expostos na TAB. 7.2

TABELA 7.1 - Valores do Limite de Liquidez, limite de Plasticidade e Índice de Plasticidade para o solo puro, solo-cal calcítica e solo-cal de carbureto, ambas a 2%, 4%, 6% e 8%, em relação ao peso de solo seco, a um tempo de cura igual a 2 horas.

<div> <div>LIMITES DE ATTER- BERG</div> <div>TEOR DE CAL</div> </div>	SOLO-CAL CALCÍTICA			SOLO-CAL DE CARBURETO		
	LL	LP	IP	LL	LP	IP
0	58,6	32,0	26,6	58,6	32,0	26,6
2	57,4	36,2	21,2	59,0	36,0	23,0
4	57,8	38,0	19,8	55,0	34,0	21,0
6	54,4	37,3	17,1	56,5	38,4	18,1
8	55,5	39,7	15,8	56,8	39,4	17,4

TABELA 7.2 - Valores do Limite de Liquidez, do Limite de Plasticidade e do Índice de Plasticidade para o solo cal calcítica e solo-cal de carbureto, ambas a 6% em relação ao peso do solo seco, a diferentes tempos de cura.

TEMPO DE CURA	SOLO-CAL CALCÍTICA			SOLO-CAL DE CARBURETO		
	LL	LP	IP	LL	LP	IP
2 horas	54,4	37,3	17,1	56,5	38,4	18,1
24 horas	58,0	41,2	16,8	64,4	47,1	17,3
48 horas	60,6	46,1	14,5	52,8	36,2	16,6

## CAPÍTULO VIII

### CONTRAÇÃO LINEAR E LIMITE DE CONTRAÇÃO VOLUMÉTRICA

Levando-se em conta a importância dos problemas causados pelo fissuramento, durante a contração por secagem ou dissecação dos solos argilosos nos pavimentos rodoviários, foram realizados ensaios, para se determinar a contração linear e o limite de contração volumétrica para o solo puro, para o solo-cal de carbureto e solo-cal calcítica.

#### CONTRAÇÃO VOLUMÉTRICA

Para determinação do limite de contração, teor de umidade a partir do qual o solo não mais se contrai, não obstante continue perdendo peso, quando em secagem, foram realizados ensaio de contração volumétrica segundo o método de ensaio MB-55 da ABNT, moldando-se pastilhas de solo puro, passando na peneira nº 40 (0,42 mm), solo-cal de carbureto e solo-cal calcítica, ambas nas percentagens 2, 4, 6 e 8, em relação ao peso do solo seco.

As pastilhas foram moldadas em cápsulas metálicas de fundo plano de 1 cm de altura por 4 cm de diâmetro, untadas com vaselina, para impedir a aderência do solo, em 3 camadas, aproximadamente iguais. Para cada camada foram aplicados golpes à cápsula até que se certificasse que todo o ar presente na amostra houvesse sido expulso.

A secagem processou-se ao ar livre, durante 24 horas e, a seguir, em estufa a  $110^{\circ}\text{C}$ , durante 24 horas.

Para medir o volume das pastilhas correspondentes ao solo seco, empregou-se o método do deslocamento de mercúrio que era recolhido em cápsulas e pesado.

O limite de contração volumétrica foi calculado pela fórmula:

$$L C = h - \left( \frac{V - V_s}{p_s} \right) \times 100$$

Sendo:

$h$  = Umidade do solo durante a moldagem da pastilha.

$V$  = Volume da pastilha de solo úmido.

$V_s$  = Volume da pastilha de solo seco.

$p_s$  = Peso do solo seco da pastilha.

#### CONTRAÇÃO LINEAR

A determinação da contração linear com o molde de 12,7 cm de comprimento, e diâmetro de 2,54 cm para a secção semi-circular, é recomendado pelo Corpo de Engenheiros dos Estados Unidos, pelo Victoria Country Roads Board e, descrito por D. Newill (10), como o mais recomendável para solos tropicais.

Com o solo passando na peneira nº 40 (0,42 mm) moldaram-se corpos de prova com o solo puro, solo-cal de carbureto e solo-cal calcítica, ambas a 2, 4, 6 e 8%, em relação ao

peso do solo seco. Cada moldagem realizou-se a uma unidade igual ao limite de liquidez + 2%, correspondente a cada mistura.

Como no ensaio para determinação do limite de contração volumétrica, untou-se o molde com vaselina e aplicaram-se golpes durante a moldagem, para se expulsar todo o ar presente na amostra.

A secagem realizou-se ao ar livre, durante 24 horas, a seguir em estufa, com a temperatura controlada, inicialmente a 60°C e, finalmente, a 110°C, durante 24 horas para cada temperatura.

A contração linear foi calculada, usanda-se a seguinte fórmula:

$$CL = \left( 1 - \frac{\text{comprimento da amostra seca}}{\text{comprimento inicial da amostra}} \right)$$

TABELA 8.1 - Valores do Limite de Contração Volumétrica para o solo-cal de carbureto e solo-cal calcítica.

PERCENTAGENS DE CAL	VALORES OBTIDOS PARA O LIMITE DE CONTRAÇÃO VOLUMÉTRICO	
	CAL DE CARBURETO	CAL CALCÍTICA
0	25	25
2	30	34
4	35	37
6	37	40
8	40	42

TABELA 8.2 - Valores da Contração Linear para o solo-cal de carbureto e solo-cal calcítica.

PERCENTAGENS DE CAL	VALORES DA CONTRAÇÃO LINEAR	
	CAL DE CARBURETO	CAL CALCÍTICA
0	13,0	13,0
2	11,4	7,5
4	7,5	6,9
6	6,5	6,2
8	6,0	5,0



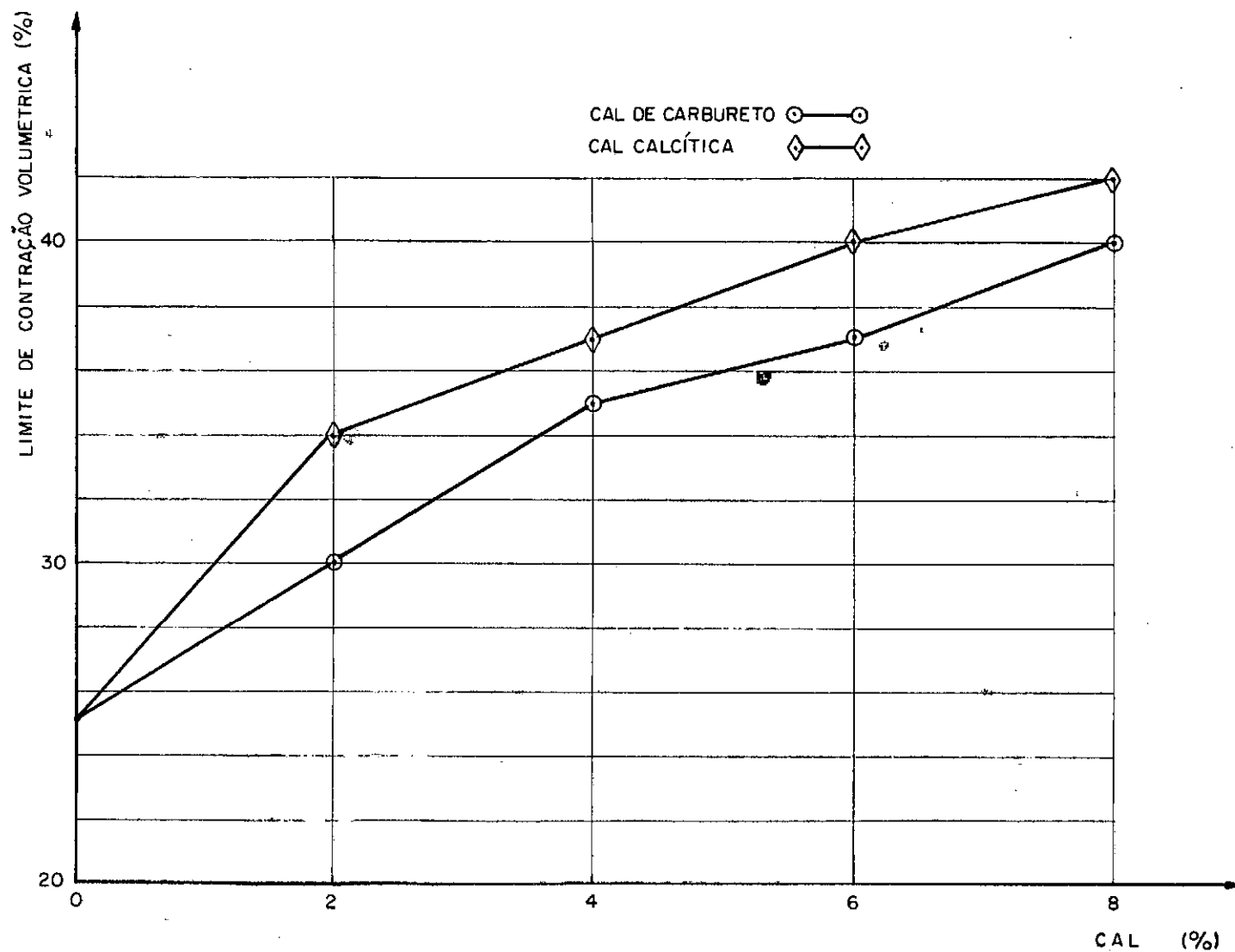


FIG. 8.1 — Variação do limite de contração volumétrica com teor de cal usado.

Para o solo-cal de carbureto e solo-cal calcítica, ambas a 2%, 4%, 6% e 8%, em relação ao peso de solo seco

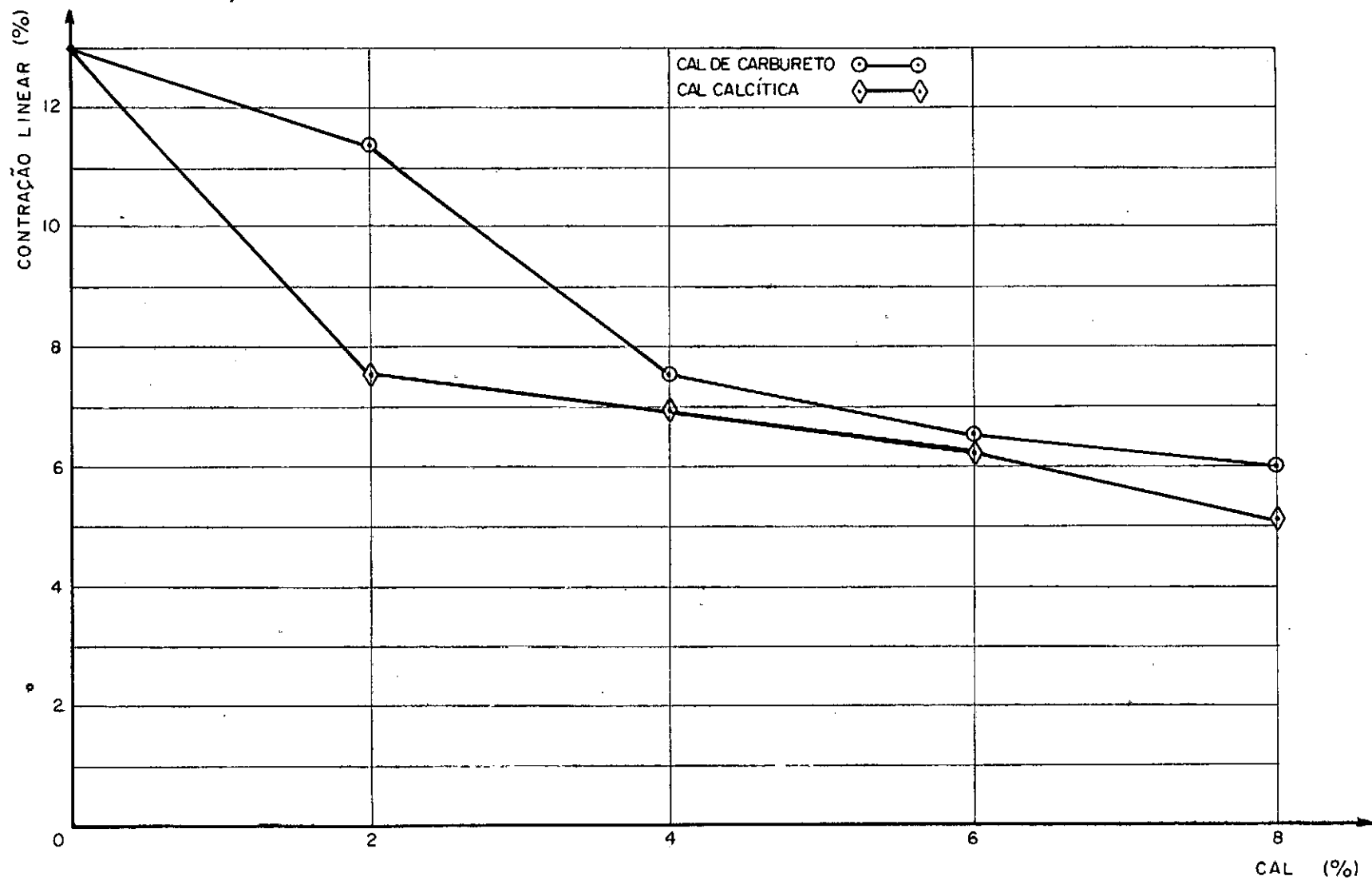


FIG. 8.2 — Variação da contração linear com o teor de cal usado.

Para o solo-cal de carbureto e solo-cal calcítica, ambas a 2% , 4% , 6% e 8% , em relação ao peso do solo seco

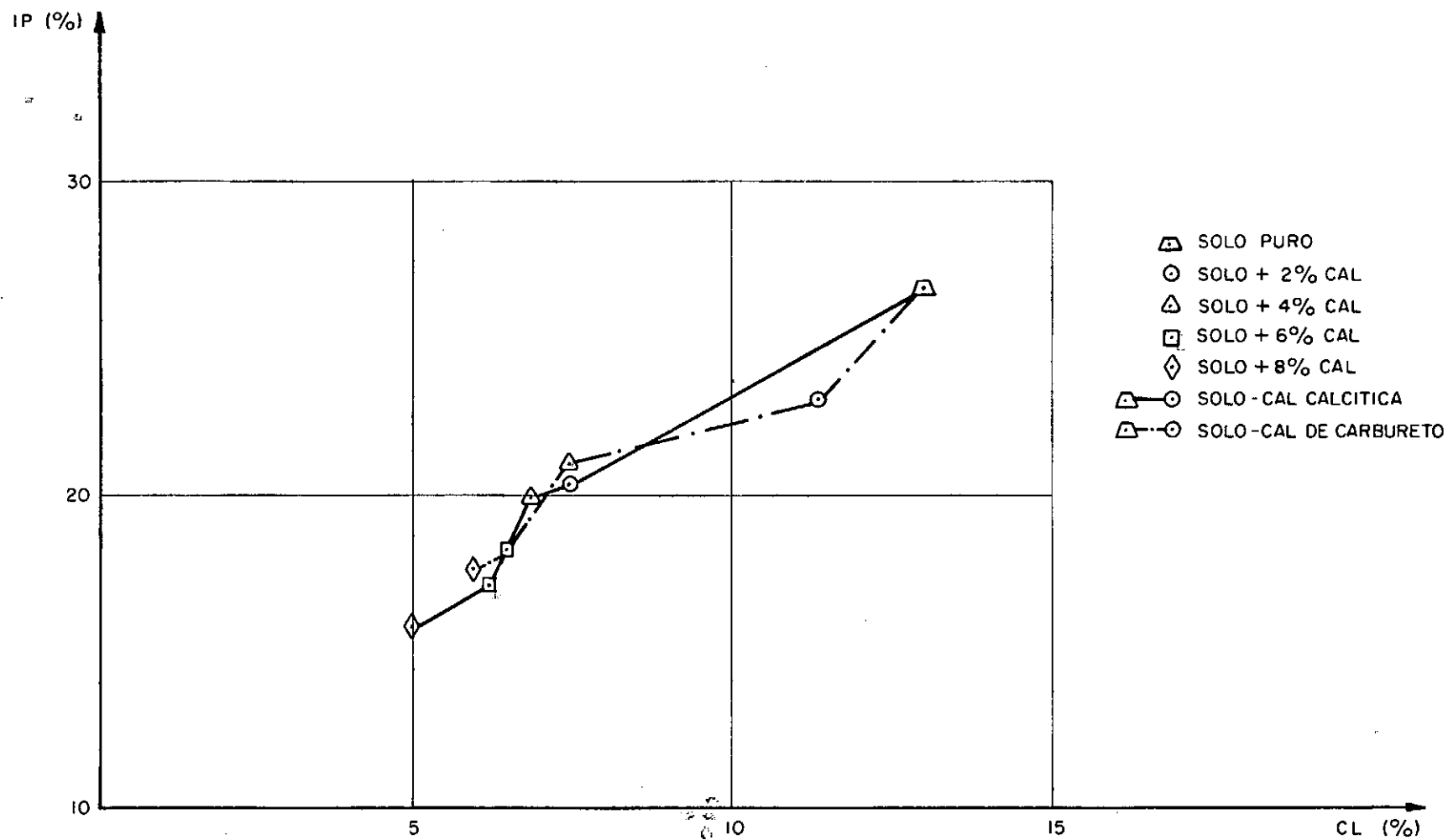


FIG. 8.3 — Índice de plasticidade versus contração linear para o solo puro , solo-cal de carbureto e solo-cal de calcítica, a 2% , 4% , 6% e 8% , em relação ao peso de solo seco.

### CONCLUSÃO

Verificou-se, como se pode notar pela figura 8.1 e TAB. 8.1, que o limite de contração volumétrica cresce com o teor de cal, ou seja, aumenta a umidade para a qual o solo permanece a volume constante, embora prosseguindo a secagem. Esses acréscimos, no limite de contração, são aproximadamente 10 % maiores para o solo-cal calcítica do que para o solo cal de carbureto, conforme se observa nas curvas comparativas da figura acima mencionada.

Os valores obtidos para a contração linear confirmam os resultados anteriores encontrados para os limites de contração volumétrica. Como se pode notar, na figura 8.2 e TAB. 8.2, o solo contrai-se, menos, a medida que se aumenta a percentagem de cal usada, e que essa contração é menor para o solo-cal calcítica do que para o solo-cal de carbureto.

Comparando-se os valores encontrados para o índice de plasticidade e para a contração linear, TAB. 7.1 e 8.2, verifica-se que existe uma relação IP/CL, igual a 2,1, para o solo puro, e que, para o solo-cal calcítica e solo-cal de carbureto, a diversos teores empregados, o valor dessa relação é aproximadamente igual a 2,8.

Observando-se as TAB. 7.2 e 8.2, verifica-se que existe uma variação na relação IP/CL, com o tempo de cura usado, na determinação do IP e que essa relação tende a tornar-se constante com o aumento do tempo de cura. Misturas que permane

ceram em cura durante 2, 24 e 48 horas, as relações IP/CL são iguais a 2,8; 2,6 e 2,5, respectivamente.

Na figura 8.3, encontram-se marcados os valores do Índice de Plasticidade versus os da Contração Linear, para o solo puro, solo-cal de carbureto e solo-cal calcítica, ambas a 2%, 4%, 6% e 8%, em relação ao peso do solo seco.

TABELA 9.1 - Valores da Expansibilidade em Função do Teor de Cal usado para o solo natural, Solo + Cal de Car**u**reto e Solo-Cal Calcítica hidratada.

% CAL	EXPANSIBILIDADE %	
	CAL CALCÍTICA	CAL CARBURETO
0	8.7	8.7
2	5.1	5.6
4	4.3	4.3
6	3.5	3.9
8	3.3	3.3

CAPÍTULO IXEXPANSIBILIDADE

Com o objetivo de se determinar a expansão do solo em estudo, solo argiloso com predominância de caoliñita e do mesmo estabilizado com cal de carbureto e cal calcítica comercial, ambas em diversas percentagens, realizaram-se ensaios de expansibilidade, especificados pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal, LNEC (11).

A amostra, com cerca de 100 g, constituída de uma porção, convenientemente homogeneizada do material, passando na peneira nº 40 (0,42 mm), obtida de acordo com o método DNER-ME 41-63, era deixada durante 16 horas em estufa a  $60^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , enquanto o solo misturado com a cal de carbureto, ou com a cal calcítica, na umidade ótima, correspondente a cada teor de cal, era deixado em câmara úmida, a uma temperatura de  $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ , para cura de 24 horas, envolto em sacos de plásticos, completamente isolado do ar atmosférico, sendo depois seco em estufa, também a  $60^{\circ}\text{C}$ , em 16 horas.

A moldagem se fazia, após o solo esfriado, em frascos hermeticamente fechados, com um molde de 15 mm de altura, fixado, junto com seu colarinho, em uma pedra porosa, colocada sobre a base do aparelho.

O solo era compactado em duas camadas aproximadamente iguais, com 50 golpes em cada, por um soquete de com-

pactação que exercia uma força de 50 Kgf, comprimido num percurso de 25 mm.

Após a colocação de água destilada dentro do recipiente, até a base superior do aparelho, obtinha-se valores cronometrados relativos à expansão em um defletômetro de 0,01 mm/div., que se apoiava sobre o corpo de prova, exercendo sobre ele uma força de 100 gf.

A expansibilidade em percentagem foi calculada pela fórmula:

$$E = \frac{\Delta H}{H_0} \times 100 = \frac{L_1 - L_0}{15} \times 100$$

E = Valor da expansibilidade

H<sub>0</sub> = Altura do molde = 15 mm

ΔH = Variação de altura

L<sub>0</sub> = Leitura inicial do defletômetro

L<sub>1</sub> = Leitura final do defletômetro, quando se obtinha 2 leituras iguais ou decrescentes num intervalo de 2 horas.



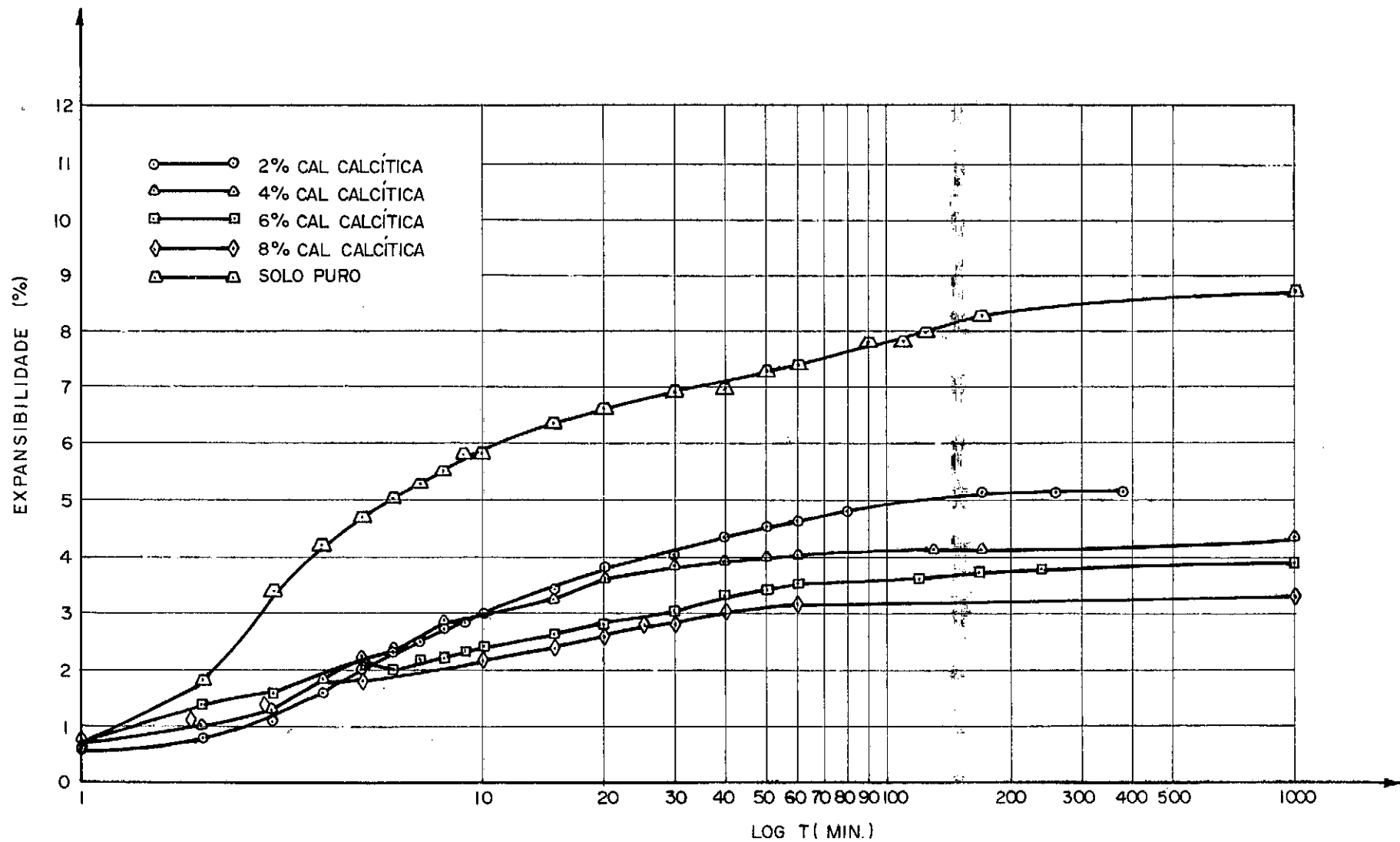


FIG.9.1 — Expansibilidade do solo puro e do solo - cal calcítica com o tempo

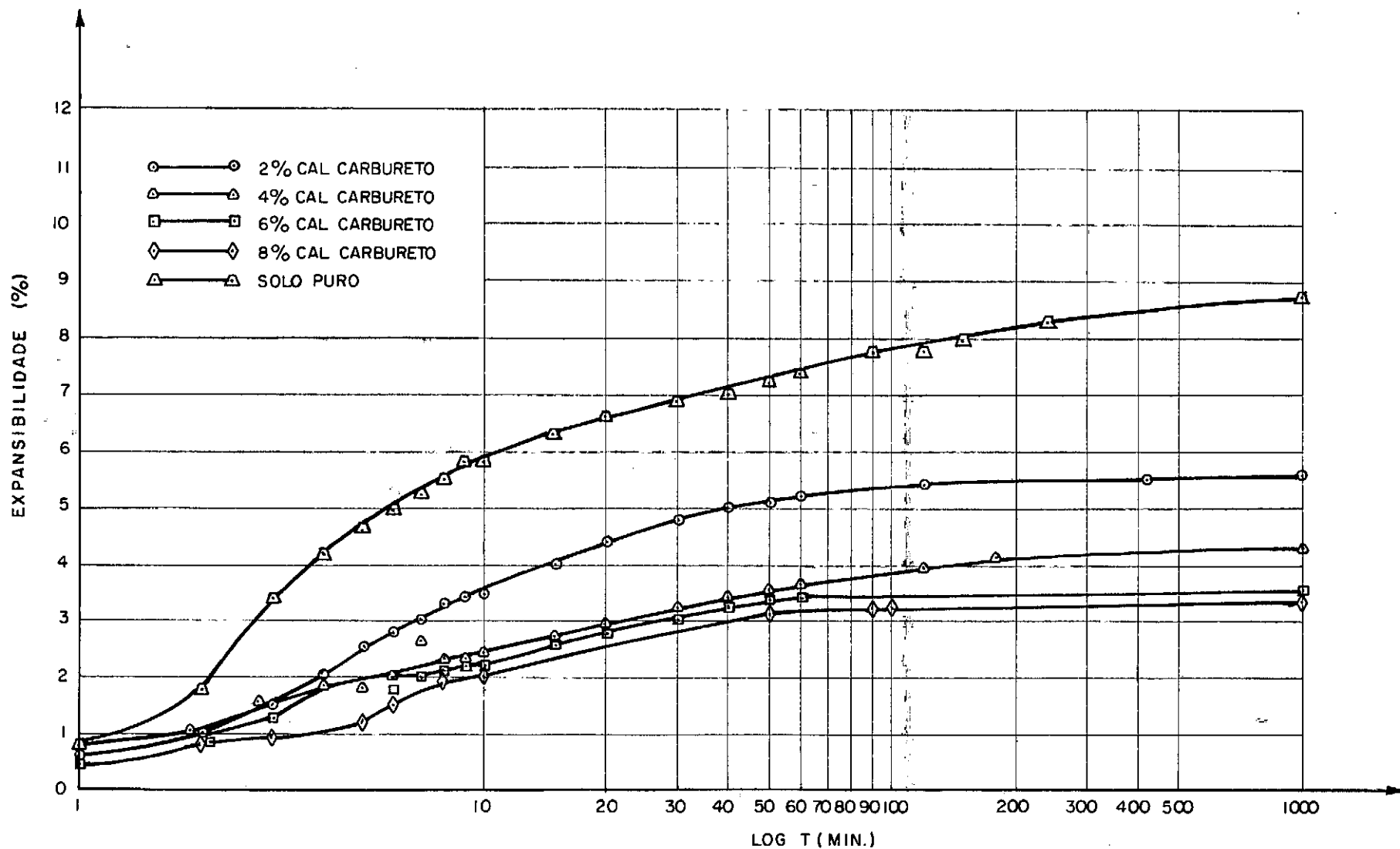


FIG.9.2 — Expansibilidade do solo puro e do solo-cal de carbureto com o tempo

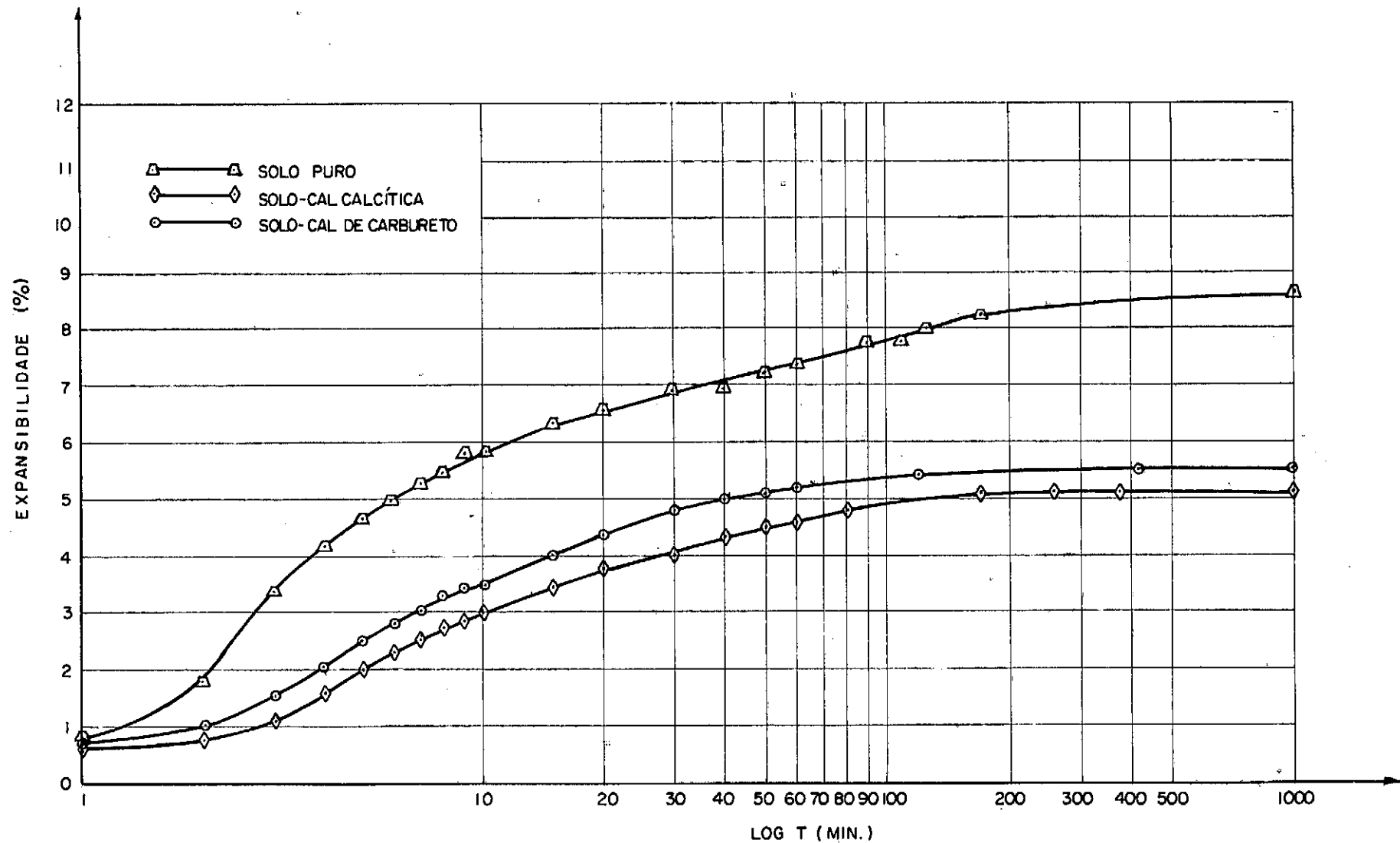


FIG.9.3 — Expansibilidade em função do tempo. Solo puro, solo-cal de carbureto e solo-cal calcítica, ambas a 2%

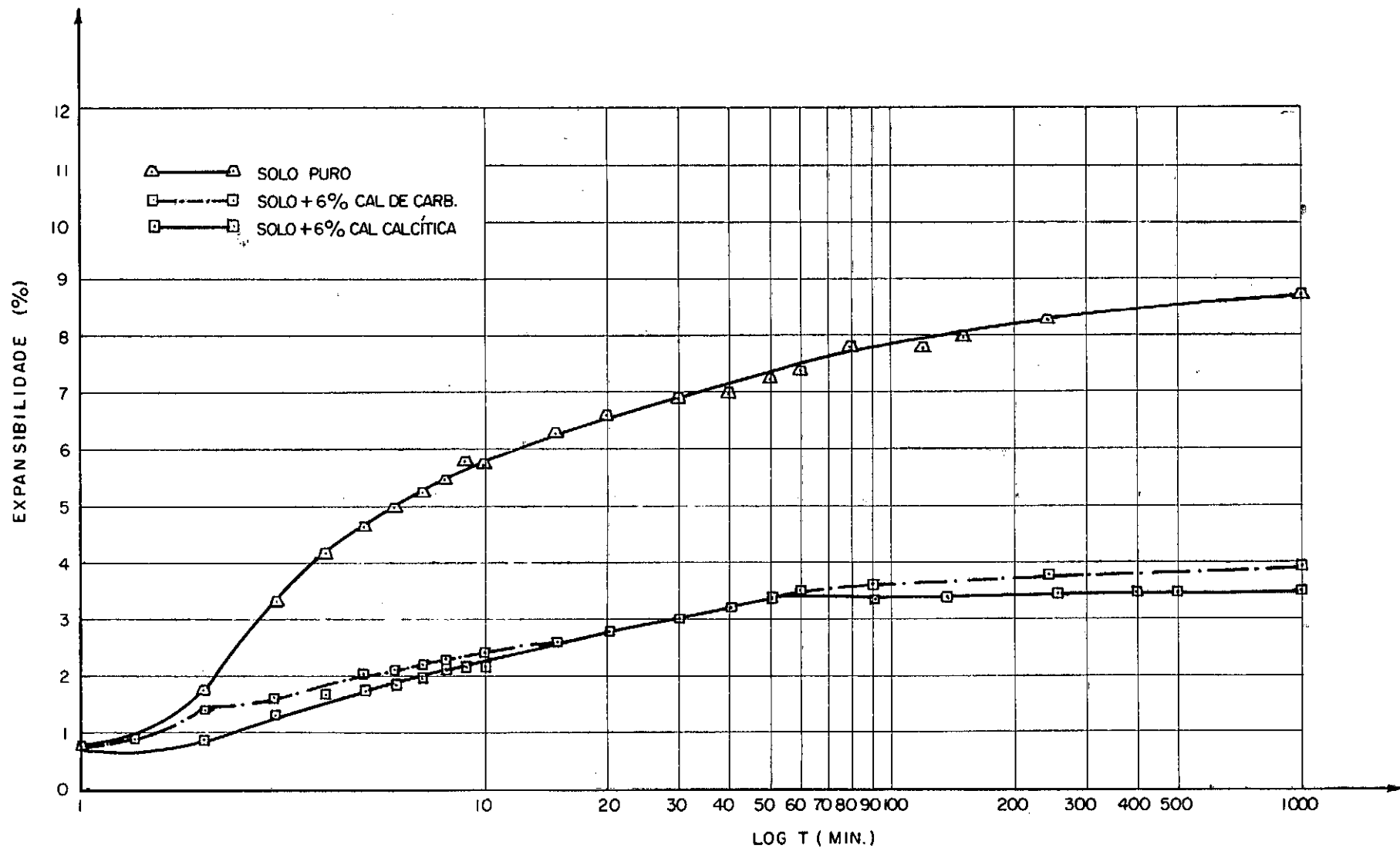


FIG.9.4 — Expansibilidade em função do tempo. Solo puro, solo-cal de carbureto e solo-cal calcítica, ambas a 6% .

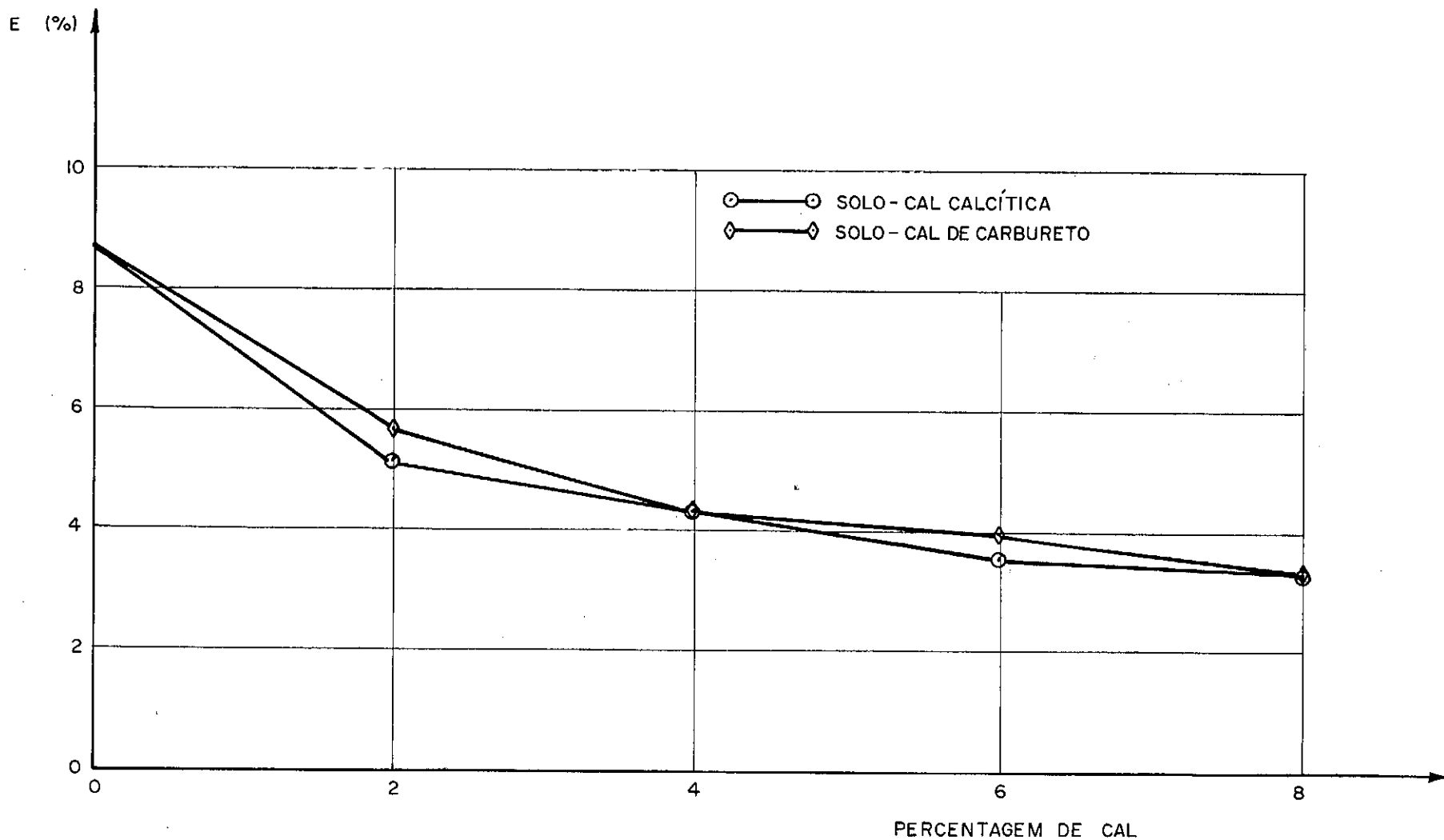


FIG. 9.5 — Expansibilidade do solo-cal de carbureto e solo-cal calcítica em função da percentagem de cal usada

### CONCLUSÃO

Como já se esperava, obtivemos pequenos valores de expansibilidade, TAB. 9.1, visto que, o solo ensaiado é de natureza caolinítica e este argilo-mineral é pouco ativo e se expande menos do que o do tipo montimorilonítico, (14) e (15).

O valor da expansibilidade do solo puro é de 9%. Embora esse valor seja inferior ao que, segundo o LNEC (12), representa os solos nocivos, ou seja 10%, resolvemos observar tan bém o efeito da cal na expansibilidade.

Foram ensaiadas misturas de solo-cal de carbureto e de solo-cal calcítica, ambas nas percentagens de 2, 4, 6 e 8, em relação ao peso de solo seco.

Verificou-se que a expansibilidade do solo diminuiu proporcionalmente com o acrêscimo de cal, como se pode observar nas figuras 9.1, 9.2 e 9.5, confirmando trabalhos ante riores, (12), (13) e (16).

Esse decréscimo na expansão é pouco maior para o solo-cal calcítica, do que para o solo-cal de carbureto, como é evidente nas figuras 9.3, 9.4 e 9.5.

CAPÍTULO XCOMPACTAÇÃO

Utilizando-se o método de Carlos Souza Pinto (17), verificamos, após várias tentativas, que o peso específico aparente máximo do solo, encontrado para o proctor normal (6 Kgf cm/cm<sup>3</sup>), era obtido através de cinco golpes em cada face do corpo-de-prova.

Moldaram-se corpos-de-prova de 5 cm de diâmetro por 5 cm de altura cada um, com uma tolerância de erro de até 2%, conforme descrição da referência (17).

Após passar o solo pela peneira nº 10 (2,0 mm) adicionou-se cal calcítica hidratada e cal de carbureto, nas percentagens de 2, 4, 6 e 8, em relação ao peso do solo seco.

Foram utilizadas cinco umidades distintas para cada mistura de solo-cal. As misturas diferiam entre si pelo teor e tipo de cal empregada.

O tempo decorrido entre a mistura e a moldagem foi de 24 horas, tendo sido as misturas, neste intervalo de tempo, envoltas em sacos de plástico, depositadas em câmara úmida, a uma temperatura de  $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ , conservando-se desse modo a umidade e isolando-se a cal do ar atmosférico.

TABELA 10.1 - Valores do peso específico aparente seco máximo ( $\text{g/cm}^3$ ) e umidade ótima (%), de ensaio de compactação do solo puro, solo-cal de carbureto e solo cal calcítica hidratada.

PERCENTAGEM DE CAL	PESO ESPECÍFICO SECO E UMI-DADE ÓTI-MA	CAL CAL-CÍTICA	CAL CARBURETO
0		1,60 21,0	1,60 21,0
2		1,52 24,5	1,57 24,0
4		1,50 25,7	1,49 25,5
6		1,42 27,5	1,47 25,0
8		1,37 28,0	1,45 27,0



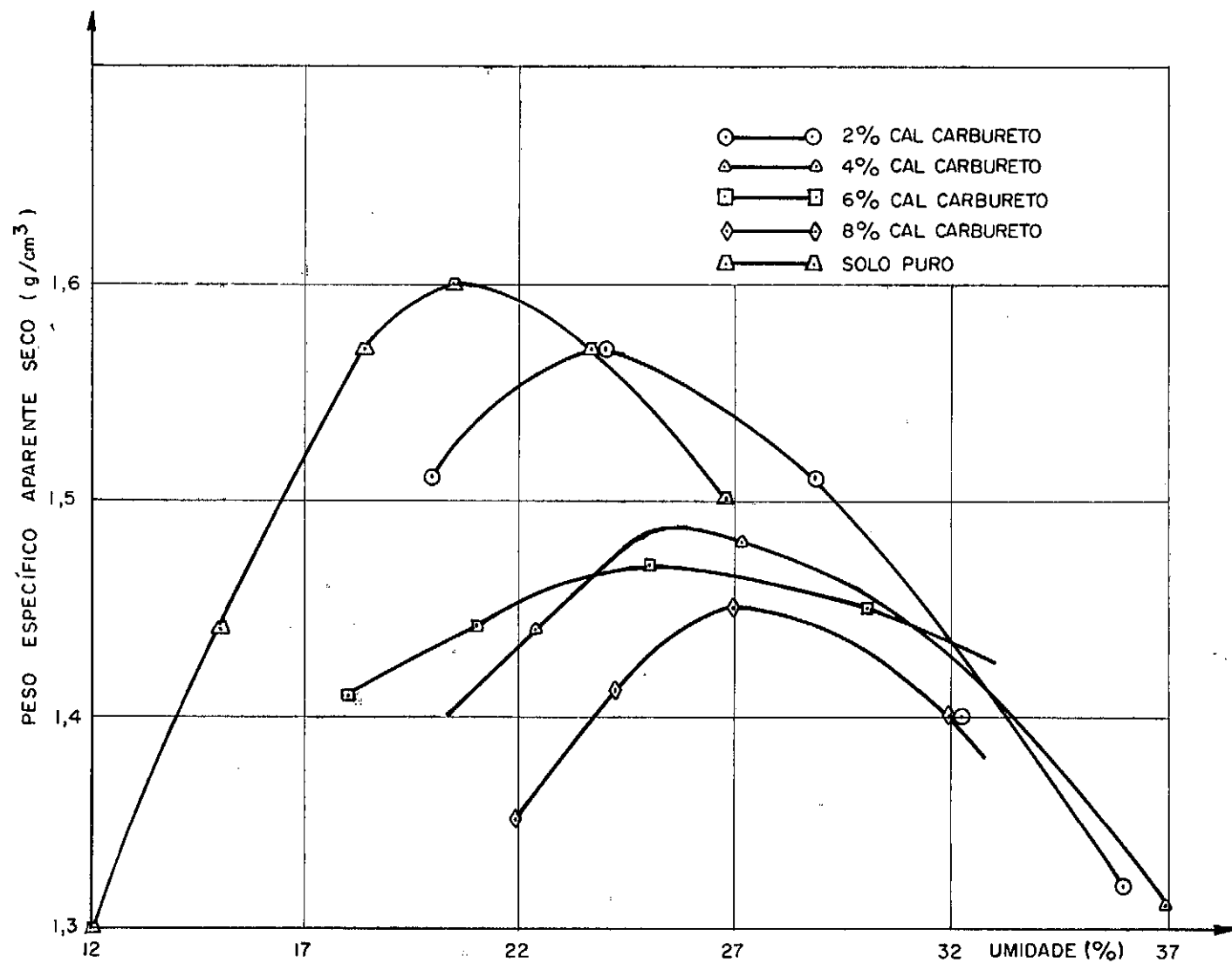


FIG. 10.1 — Relação entre o peso específico aparente seco e umidade de compactação, solo puro e solo-cal de carbureto

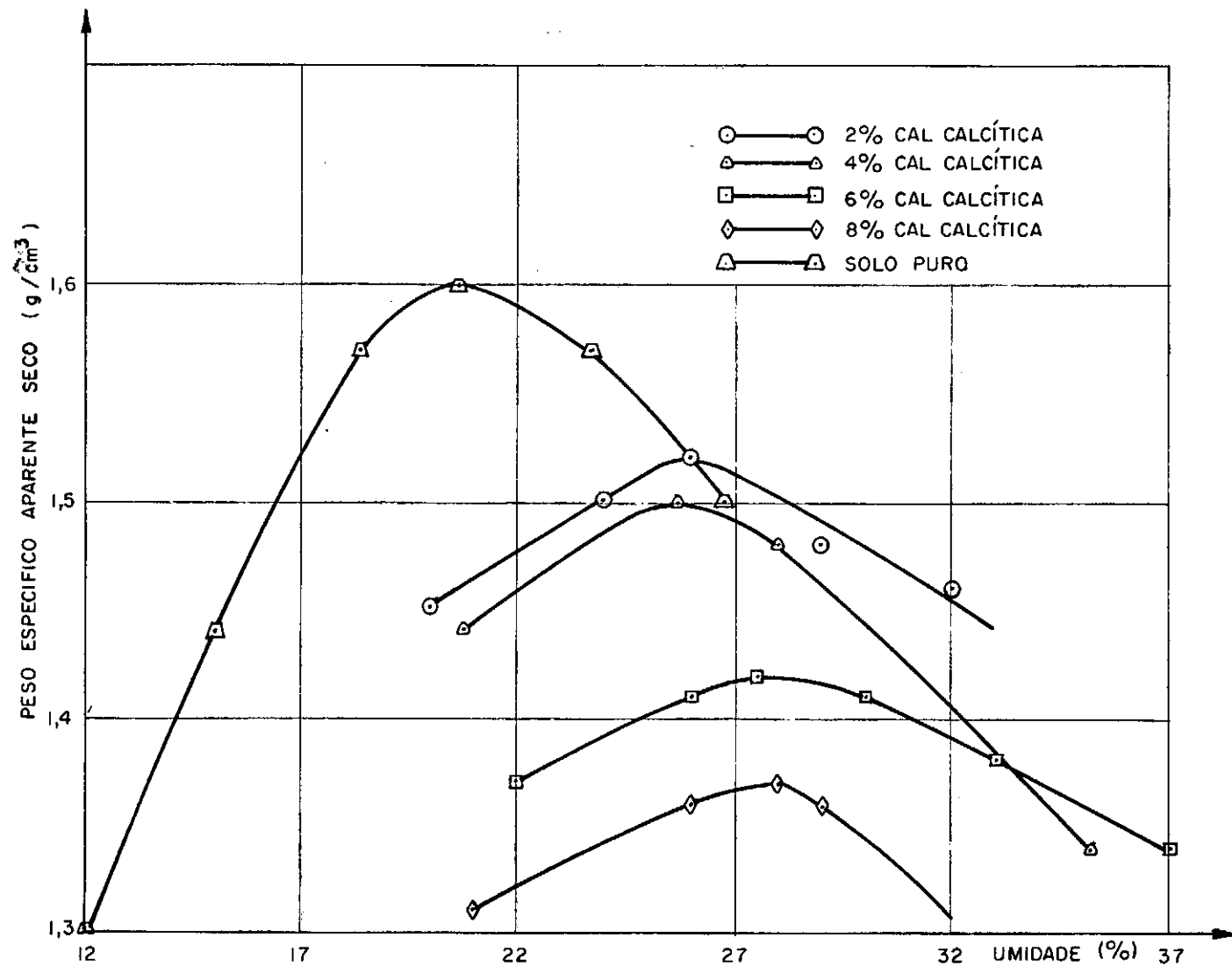


FIG. 10.2— Relação entre o peso específico aparente seco e umidade de compactação, solo puro e solo -cal calcítica

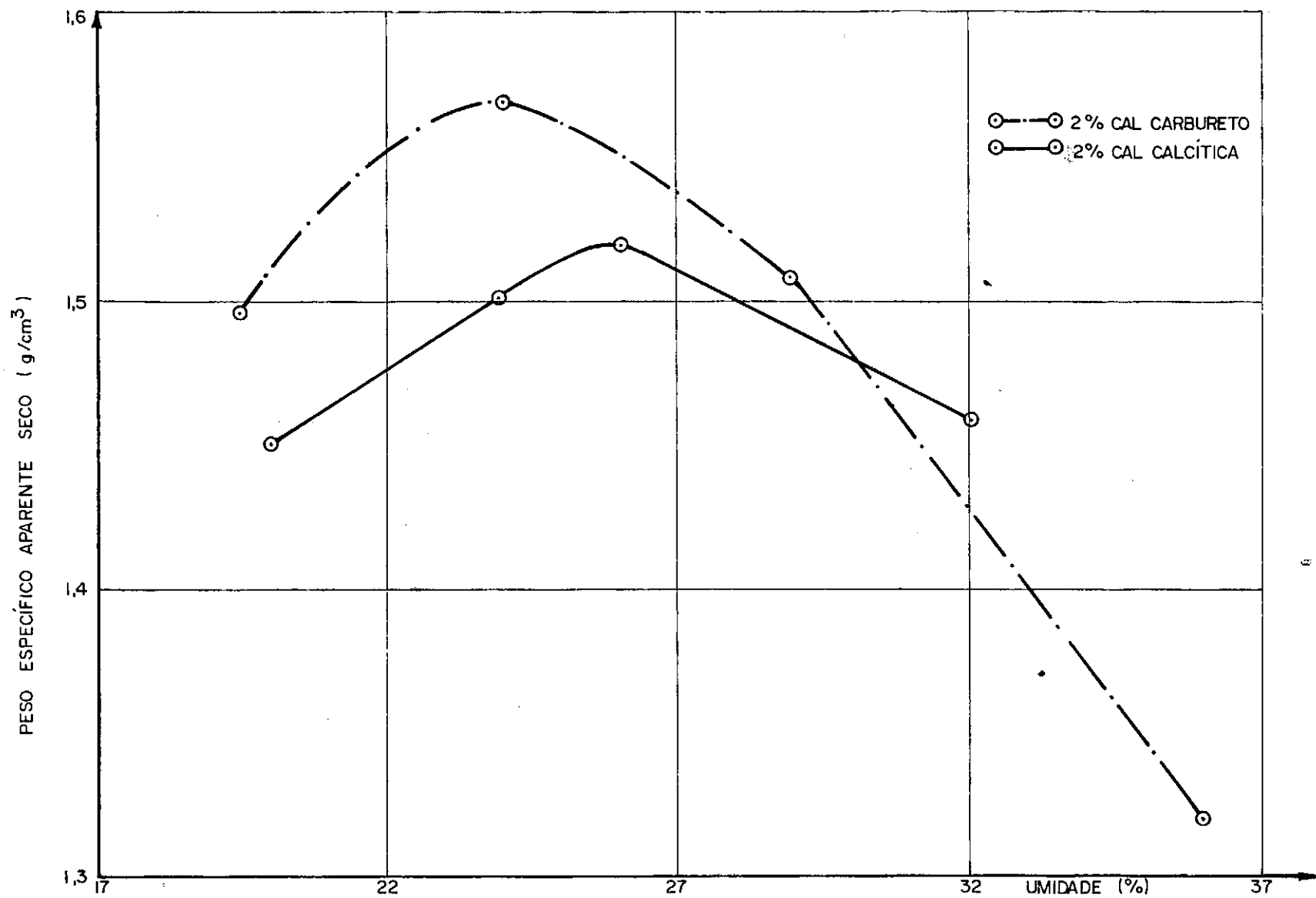


FIG.10.3 — Relação entre o peso específico aparente seco e umidade de compactação para o solo-cal calcítica e solo-cal carbureto, ambos a 2%

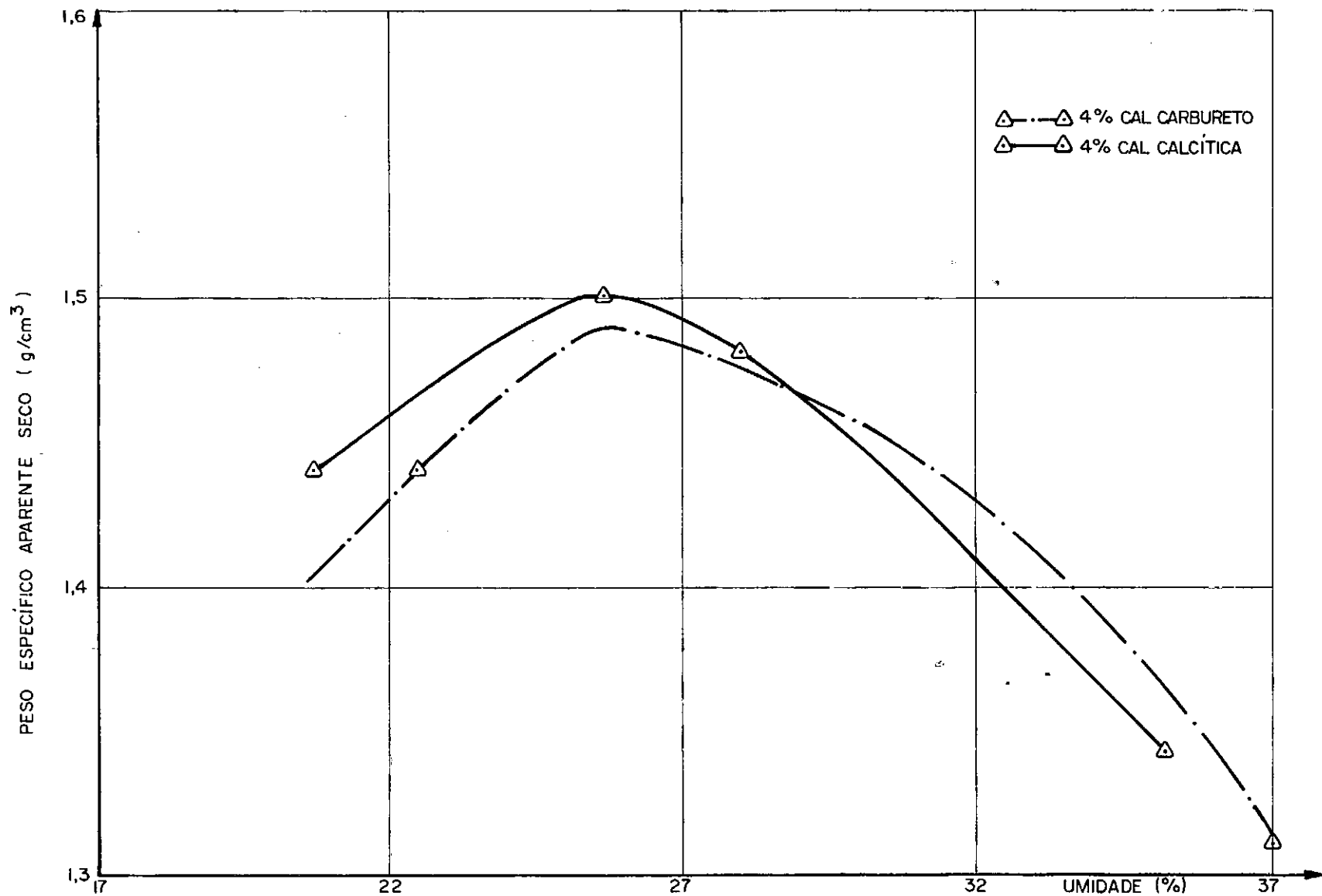


FIG.10.4 — Relação entre o peso específico aparente seco e umidade de compactação para o solo-cal calcítica e solo-cal carbureto, ambos a 4%

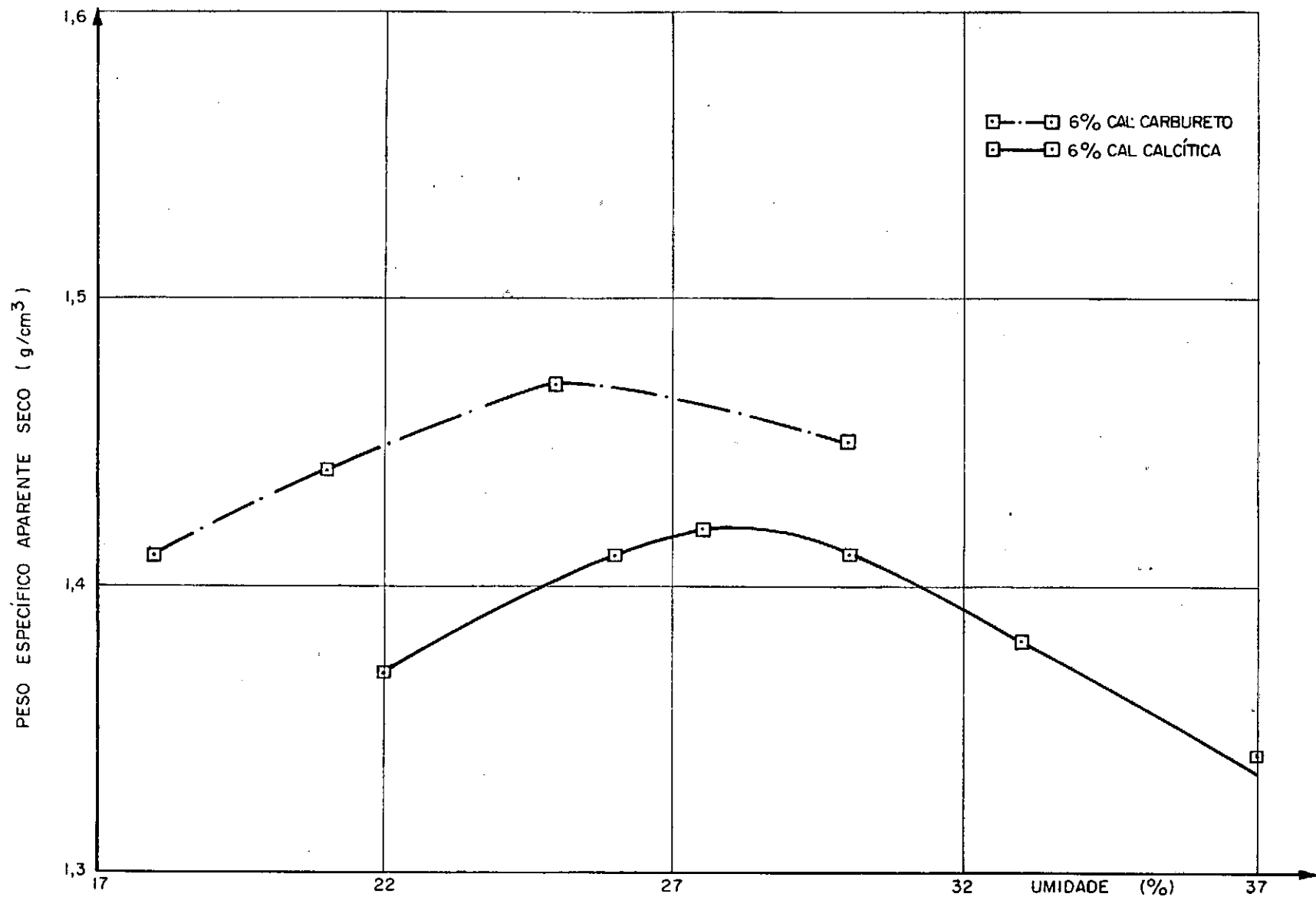


FIG.10.5 — Relação entre o peso específico aparente seco e umidade de compactação para o solo-cal calcítica e solo-cal carbureto, ambos a 6%

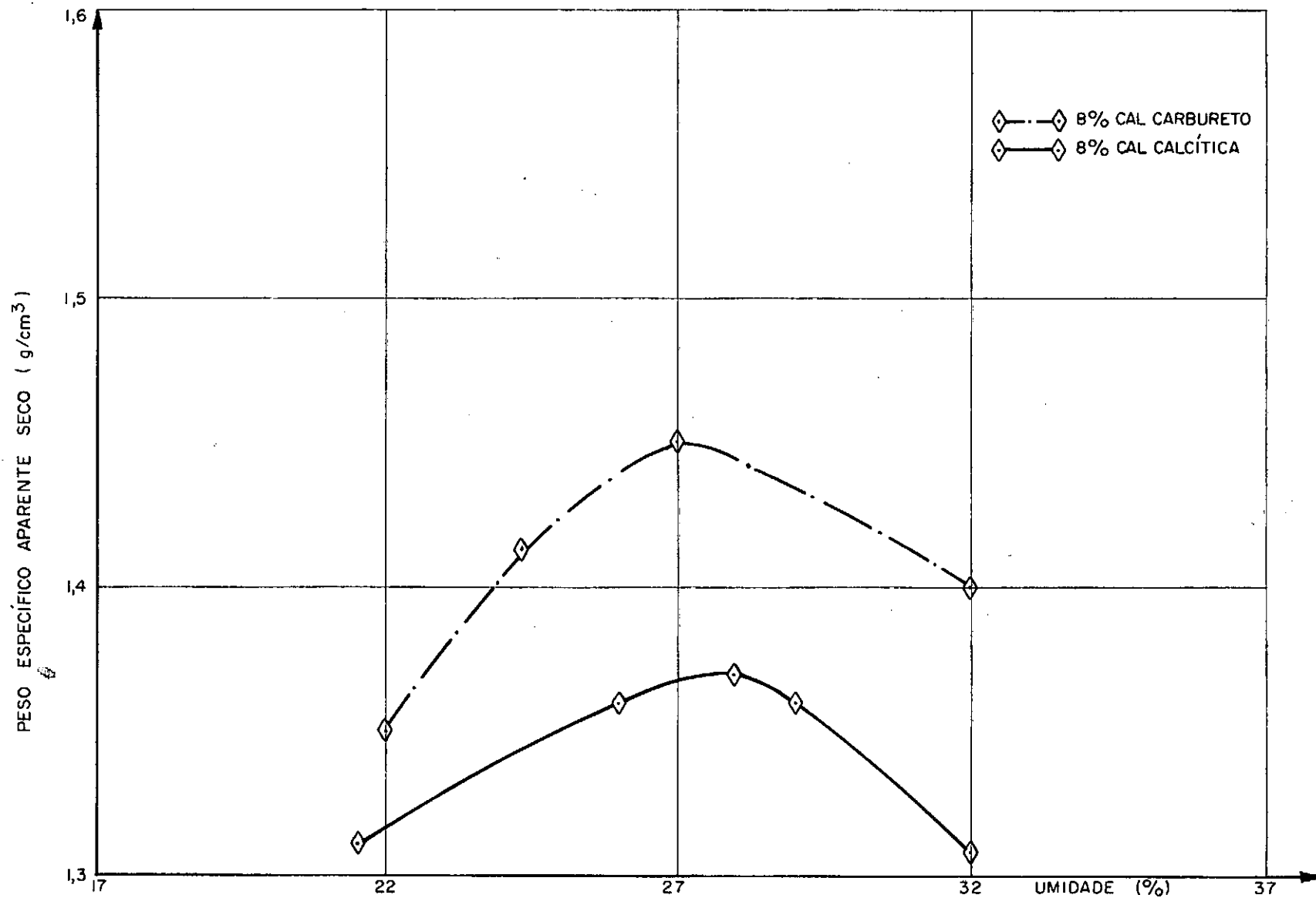


FIG. 10.6 — Relação entre o peso específico aparente seco e umidade de compactação para o solo-cal calcítica e solo-cal carbureto, ambos a 8%

### CONCLUSÃO

Como se pode verificar nas figuras 10.1 e 10.2, o peso específico seco máximo decresce e a umidade ótima cresce com a percentagem de cal usada, como já tinha sido confirmado em trabalhos anteriores (23), (25) e (26).

Isso ocorre, segundo O'Flaherty e Cabrera e endossada por Oliveira Ferro (24), devido à floculação das partículas de argila, em decorrência de sua adsorção dos íons cálcio, cedidos pela cal. Essa estrutura floculada do solo-cal, contendo microporos, causa um decréscimo de massa para um mesmo volume e, assim, um menor peso específico, acarretando, também, acréscimos na umidade ótima.

Analisando-se as figuras 10.3, 10.4, 10.5, 10.6 e os valores da TAB. 10.1 verifica-se que o decréscimo do peso específico máximo e o acréscimo na umidade ótima, em amostras compactadas após uma cura de 24 horas, são menores para o solo-cal de carbureto do que para o solo-cal calcítica. Tal fato, provavelmente, decorre devido a uma floculação das partículas de argila do solo-cal de carbureto. Essa menor floculação se explica pela menor quantidade de íons cálcio existentes na cal de carbureto, em igualdade de percentagem de cal. Como se pode verificar pela TAB. 3.1, o teor disponível de íons cálcio, na cal de carbureto é aproximadamente  $2/3$  do teor disponível na cal calcítica.

CAPÍTULO XIÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA

A moldagem de corpos-de-prova para se determinar o valor relativo do suporte do solo puro, solo-cal de carbureto e solo-cal calcítica realizou-se segundo o método de ensaio DNER-ME 49-64, em cinco camadas, recebendo 12 golpes cada, ou seja, a uma energia de compactação correspondente ao proctor normal (AASHO standart), para solos de subleito.

Para o solo-cal realizaram-se duas curas: a primeira, de 24 horas de duração, desenvolvida entre a mistura e a moldagem; a segunda, de 72 horas após a moldagem.

Tanto as misturas, quanto os corpos-de-prova moldados permaneceram em cura, envoltos em sacos de plástico impermeáveis, em câmara úmida, a uma temperatura de  $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ .

Na imersão para o solo puro e para o solo-cal, os corpos-de-prova ficaram sob uma carga de 4,5 Kg, durante 96 horas. E foram rompidos por uma prensa hidráulica de 60 kN, munida de um anel dinamométrico de 10 kN de capacidade.



TABELA 11.1 - Pressões obtidas para cada penetração, no ensaio de CBR para o solo-cal de carbureto e solo puro.

PENETRAÇÃO PRESSÃO Kg <sub>f</sub> /cm <sup>2</sup>	PERCENTAGENS DE CAL DE CARBURETO				
	0	2	4	6	8
0,25	2,52	3,63	2,80	3,92	3,92
0,50	3,64	7,08	5,04	7,56	7,60
0,75	5,04	8,08	7,00	10,92	11,20
1,00	6,16	9,87	9,24	14,00	14,56
1,50	8,12	11,68	12,60	18,20	19,60
2,00	10,08	13,62	15,68	21,84	24,08
3,00	13,16	15,59	20,72	28,56	30,80
4,00	15,40	17,66	25,76	32,48	38,08
5,00	17,92	17,97	28,56	37,80	42,00

TABELA 11.2 - Pressões obtidas para cada penetração, no ensaio de CBR para o solo puro e solo-cal calcítica hidratada

PENETRAÇÃO PRESSÃO Kg <sub>f</sub> /cm <sup>2</sup>	PERCENTAGENS DE CAL CALCÍTICA				
	0	2	4	6	8
0,25	2,52	3,60	9,84	12,43	16,02
0,50	3,64	9,07	15,55	20,04	23,30
0,75	5,04	14,06	20,05	24,13	28,43
1,00	6,16	16,78	23,35	28,48	32,63
1,50	8,12	22,54	28,40	33,09	38,14
2,00	10,08	27,96	32,51	38,06	42,71
3,00	13,16	30,30	38,67	42,21	48,73
4,00	15,40	35,81	44,51	48,52	53,18
5,00	17,92	37,65	47,83	52,41	58,08

TABELA 11.3 - Variação do valor do CBR com a va  
riação da percentagem de cal calcítica e de cal de carbureto.

<div>CBR (%)</div> <div>TIPO DE CAL</div>	PERCENTAGEM DE CAL				SOLO PURO
	2	4	6	8	
CAL DE CALCÍTICA	27	37	41	47	9
CAL CARBURETO	13	15	21	23	

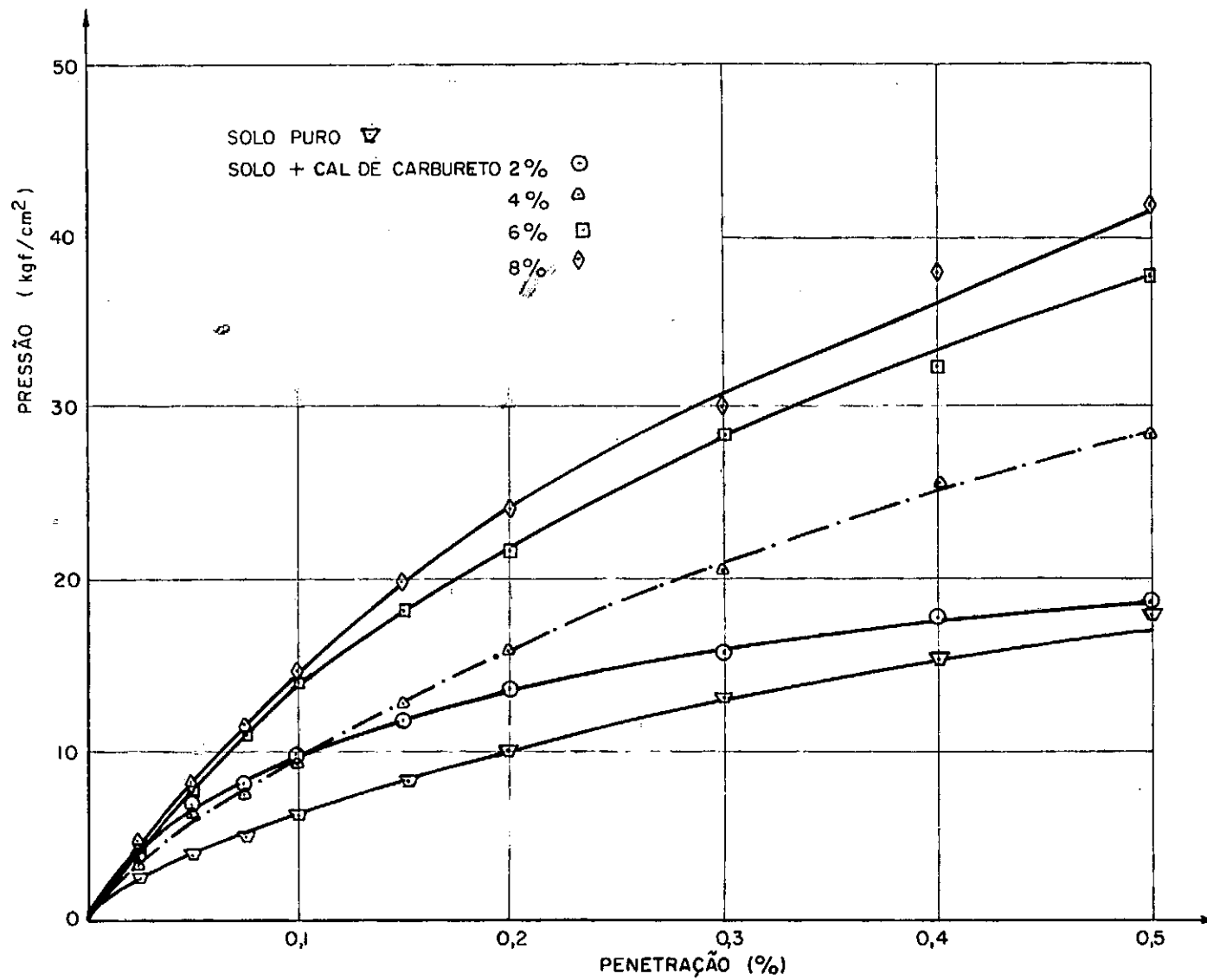


FIG.11.1 — Curva de pressão versus penetração do solo puro e solo-cal de carbureto

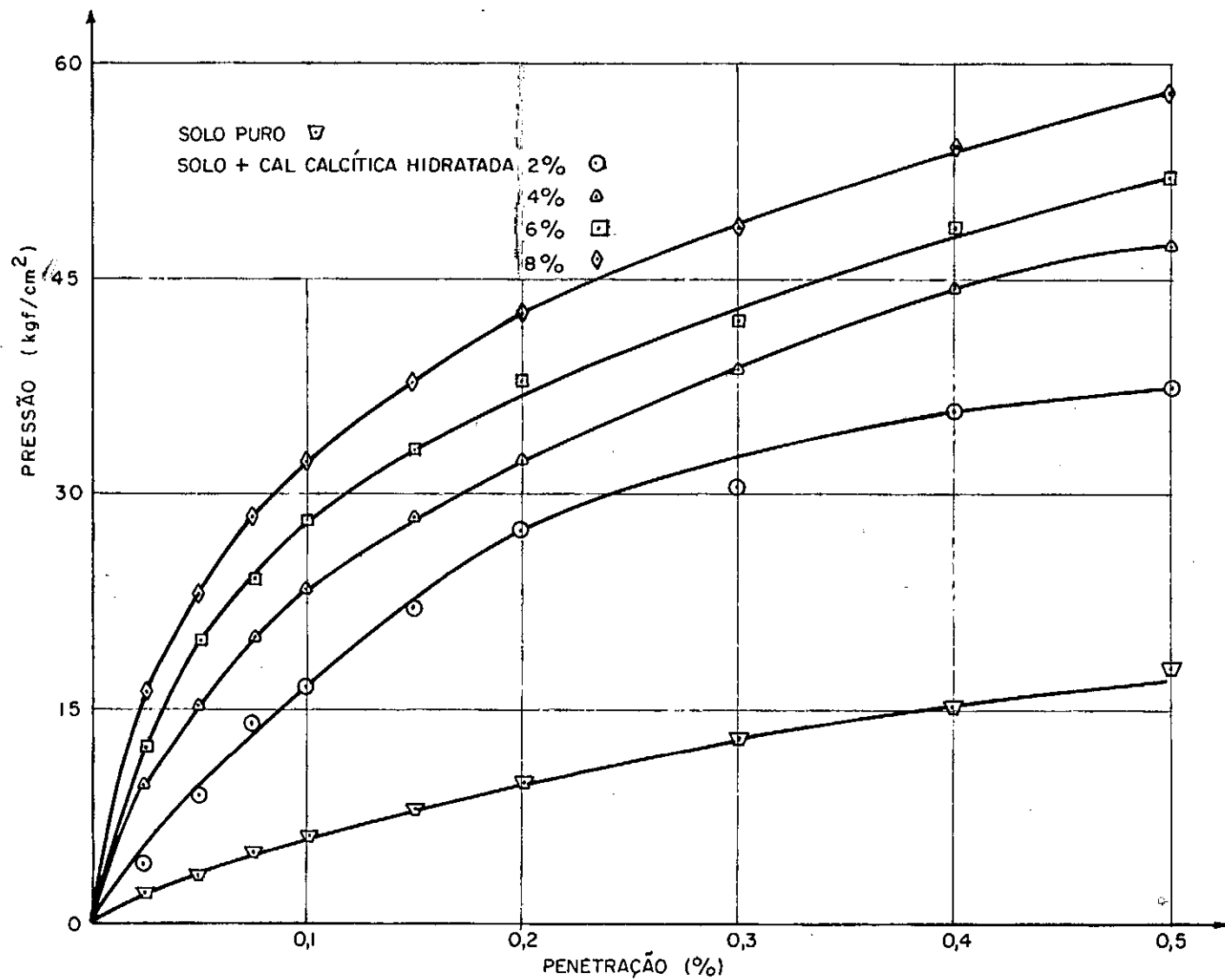


FIG. II.2 — Curva de pressão versus penetração do solo puro e solo-cal calcítica hidratada

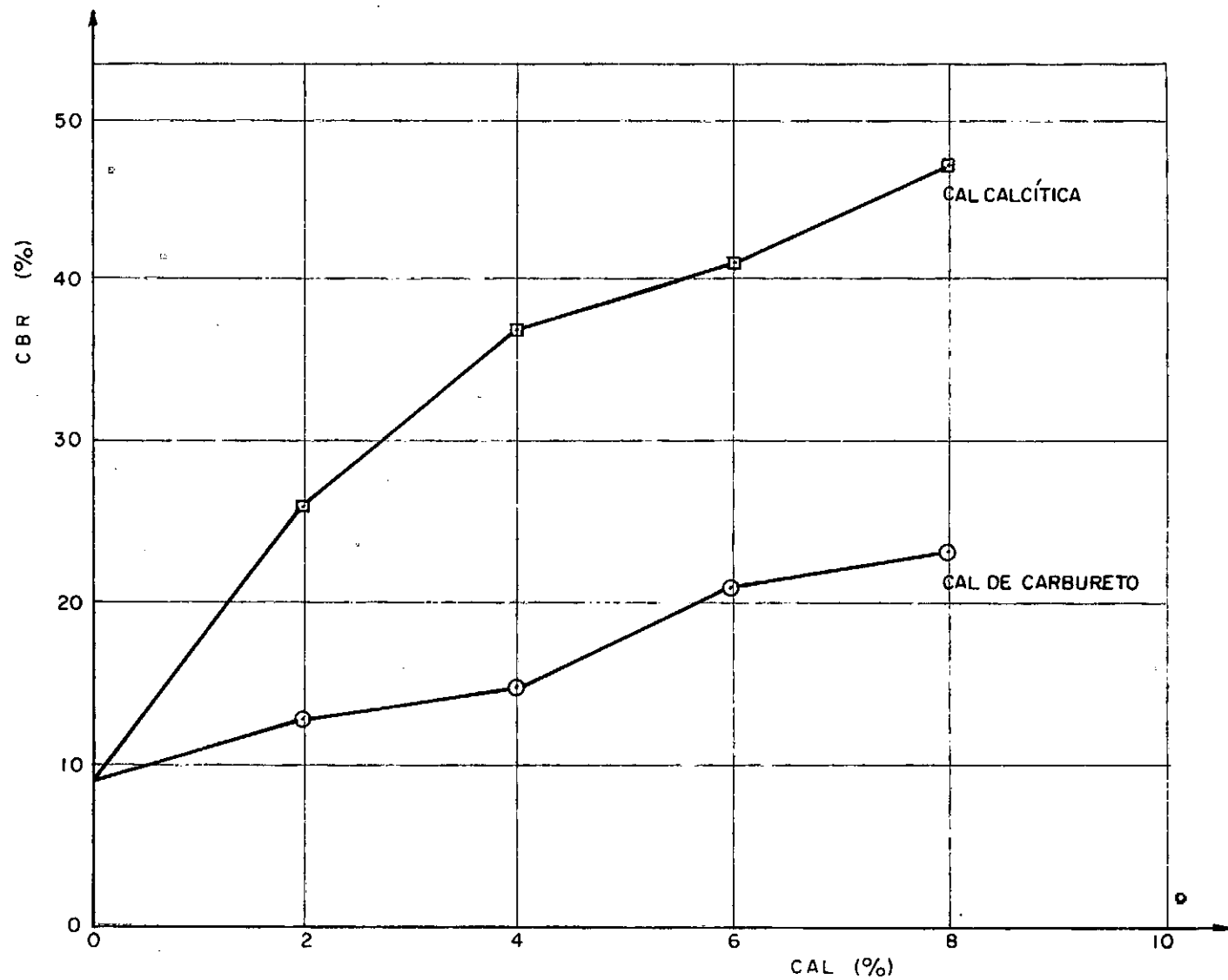


FIG.11.3 — Variação do CBR do solo em relação ao teor de cal usada, umidade 20 %, rompimento após cura e imersão

### CONCLUSÃO

Exemplos representativos das curvas de pressão versus penetração são mostrados nas figuras 11.1 e 11.2. Na figura 11.1 estão marcados os valores obtidos para o solo puro e solo-cal de carbureto, nas percentagens 2, 4, 6 e 8, em relação ao peso de solo seco. Na figura 11.2, encontram-se marcados os valores de pressão versus penetração, obtidos no rompimento do solo-cal calcítica, nas mesmas percentagens anteriores, os valores numéricos encontram-se nas tabelas 11.1 e 11.2.

Os valores encontrados para o CBR do solo puro, solo-cal de carbureto e solo-cal calcítica, nas mesmas percentagens acima referidos encontram-se marcados na figura 11.3 e TAB. 11.3. Como era previsto (21), o valor do CBR aumentou com a percentagem de cal empregada. Verificou-se, também, que os valores do CBR para o solo estabilizado com a cal calcítica são aproximadamente o dobro dos valores obtidos para o solo estabilizado com a cal de carbureto para cada percentagem usada.

Analisando-se ainda esses valores obtidos para os suportes do solo-cal de carbureto e do solo-cal calcítica, TAB. 11.3, verifica-se que para encontrarmos um mesmo valor do CBR, para ambas as misturas, seria recomendável usar-se uma quantidade aproximadamente 4 vezes maior de cal de carbureto.

Apesar de ser a caolinita o principal argilo-mineral presente, obteve-se um notável incremento de resistência no valor de suporte do solo. Segundo Harty e Thompson (22), e

endossados por O. Ferro (23), para solos tropicais vermelhos, caso da argila estudada, mais importante que o total de sílica e/ou alumina constituinte do solo é o seu grau de intemperização e que as reações entre a cal e os óxidos de ferro e alumínio não devem ser desprezadas.

CAPÍTULO XIIRESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NÃO CONFINADA

Utilizando-se o molde reduzido de compactação de Carlos Souza Pinto (18), para moldagem de corpos-de-prova de solo-aditivo, foi encontrado como equivalente ao Proctor Normal, energia correspondente a  $6 \text{ Kgf.cm/cm}^3$ , a aplicação de 5 golpes em cada face do corpo-de-prova.

Com o solo passando na peneira nº 10 (2,00 mm), fizeram-se misturas íntimas com o solo-cal calcítica, e com o solo-cal de carbureto, em percentagens de 2, 4, 6, 8, em relação ao peso do solo seco, na umidade ótima, correspondente a cada percentagem (TAB. 10.1).

Passadas 24 horas, envoltas em sacos de plástico, em câmara úmida, moldaram-se os corpos-de-prova com as misturas de solo-cal calcítica e solo-cal de carbureto, em 3 unidades, para cada teor de aditivo e para cada idade de cura.

Moldados os corpos-de-prova e envoltos em papel de alumínio, para a conservação de sua umidade e para isolar a cal de anidrido carbônico do ar atmosférico, foram deixados em repouso em câmara úmida, para curas de 7, 14 e 28 dias, e também para cura de 72 horas, em estufa a  $60^{\circ}\text{C}$ , com o objetivo de verificar a resistência do corpo-de-prova que, segundo Eades, Grim e Nichols (27), seria correspondente a resistência de campo de um ano.



Após a cura, os corpos-de-prova foram deixados, por 3 dias, imersos em água destilada, à temperatura ambiente de 22°C, para garantir a saturação.

Para a ruptura dos corpos-de-prova foi usada a prensa Wikeham-Farrance-T-57, munida de um anel dinamométrico com capacidade de 1tf e constante igual a  $2,45 \times 10^{-1}$  kgf/div., e um defletômetro de graduação de 0,01 mm. A velocidade usada para a deformação foi de 1%/min., correspondente a 0,5 mm/min.

De acordo com a ASTM-C-109-58, calculou-se a média dos resultados dos 3 corpos-de-prova para cada teor de cãl e idade de cura, com uma tolerância de 10%.

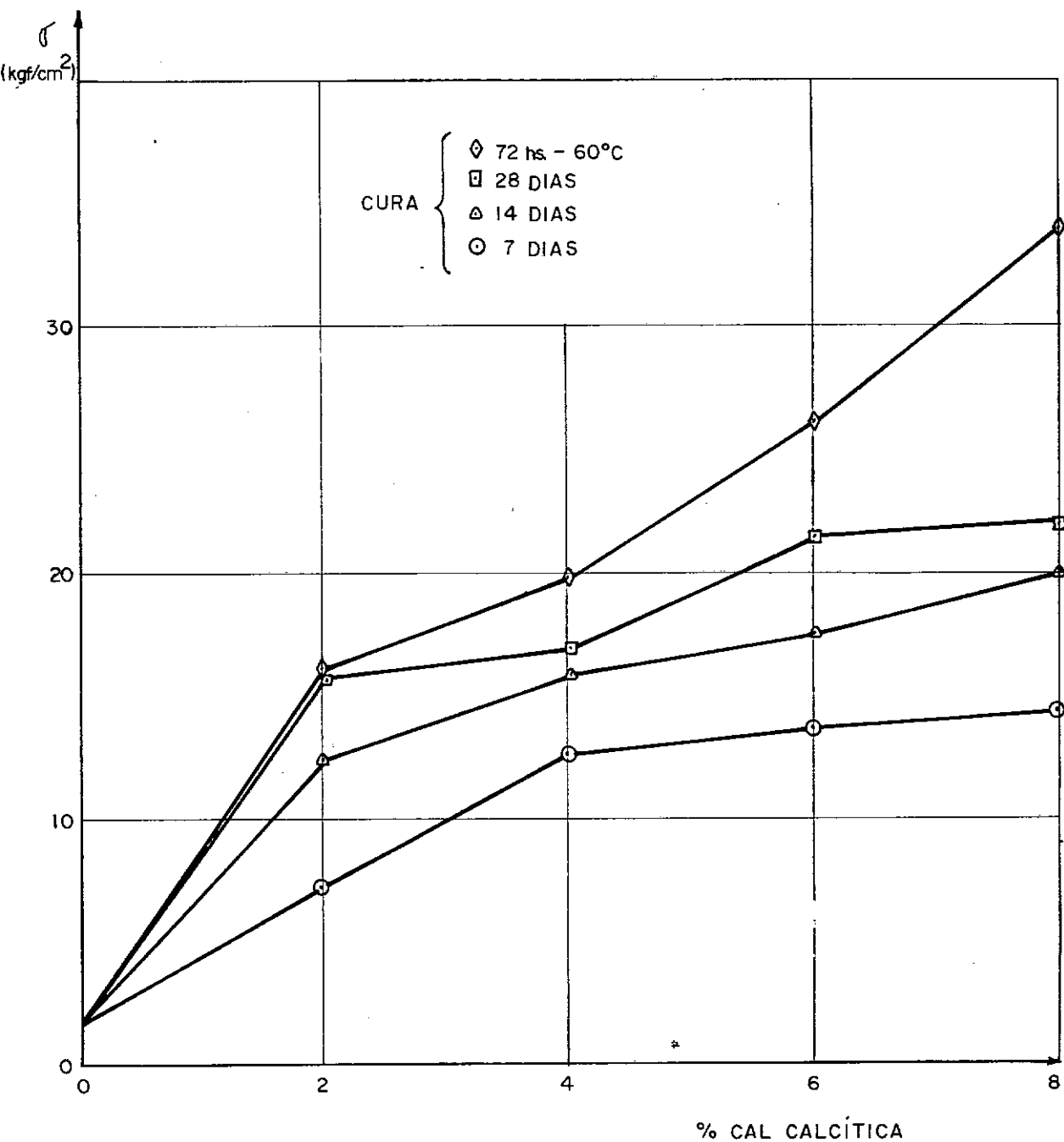


FIG. 12.1 — Resistência à compressão simples solo-cal calcítica hidratada

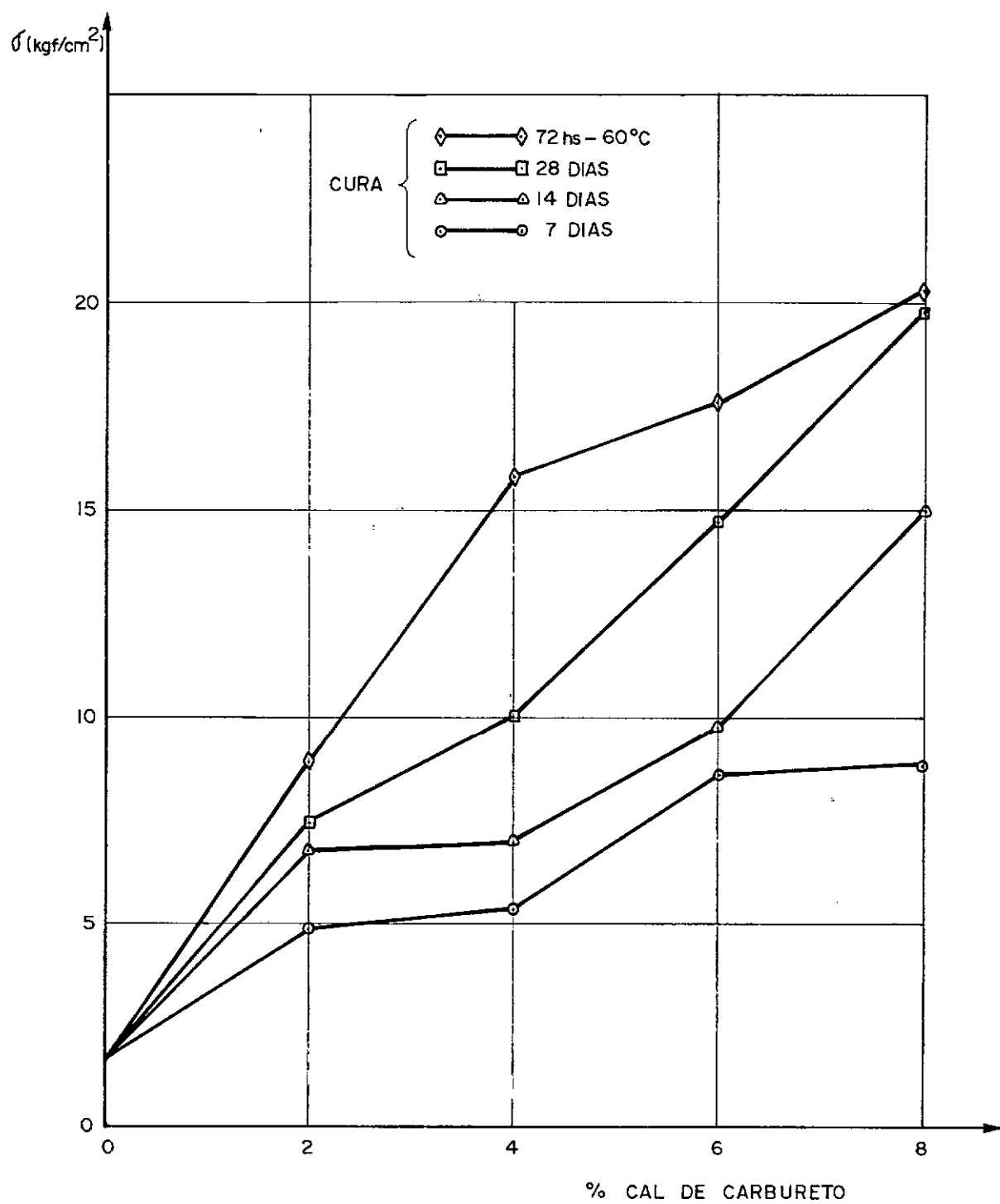


FIG. 12.2 — Resistência à compressão simples, solo - cal de carbureto

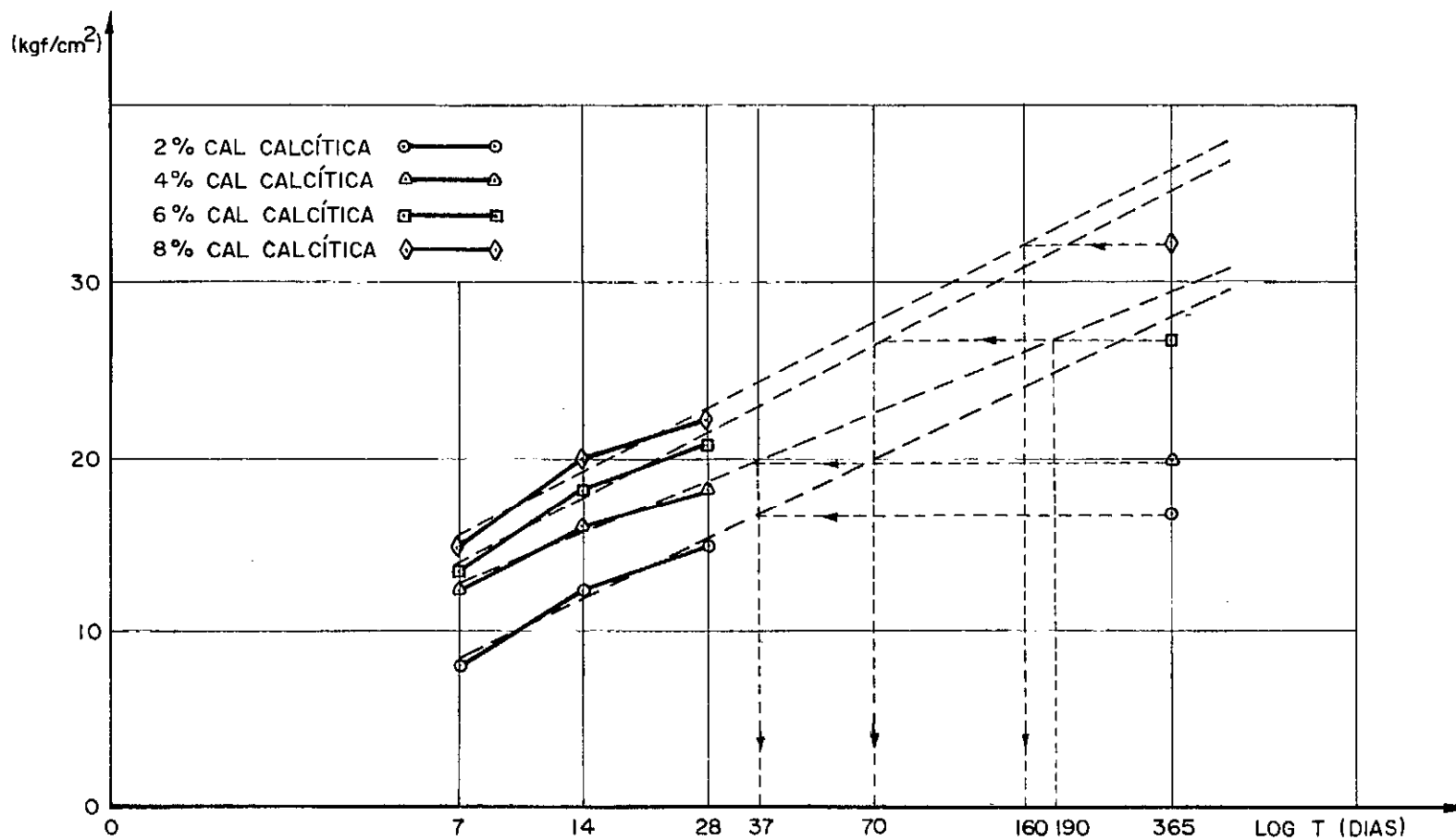


FIG. 12.3 — Resistência à compressão simples, solo-cal calcítica

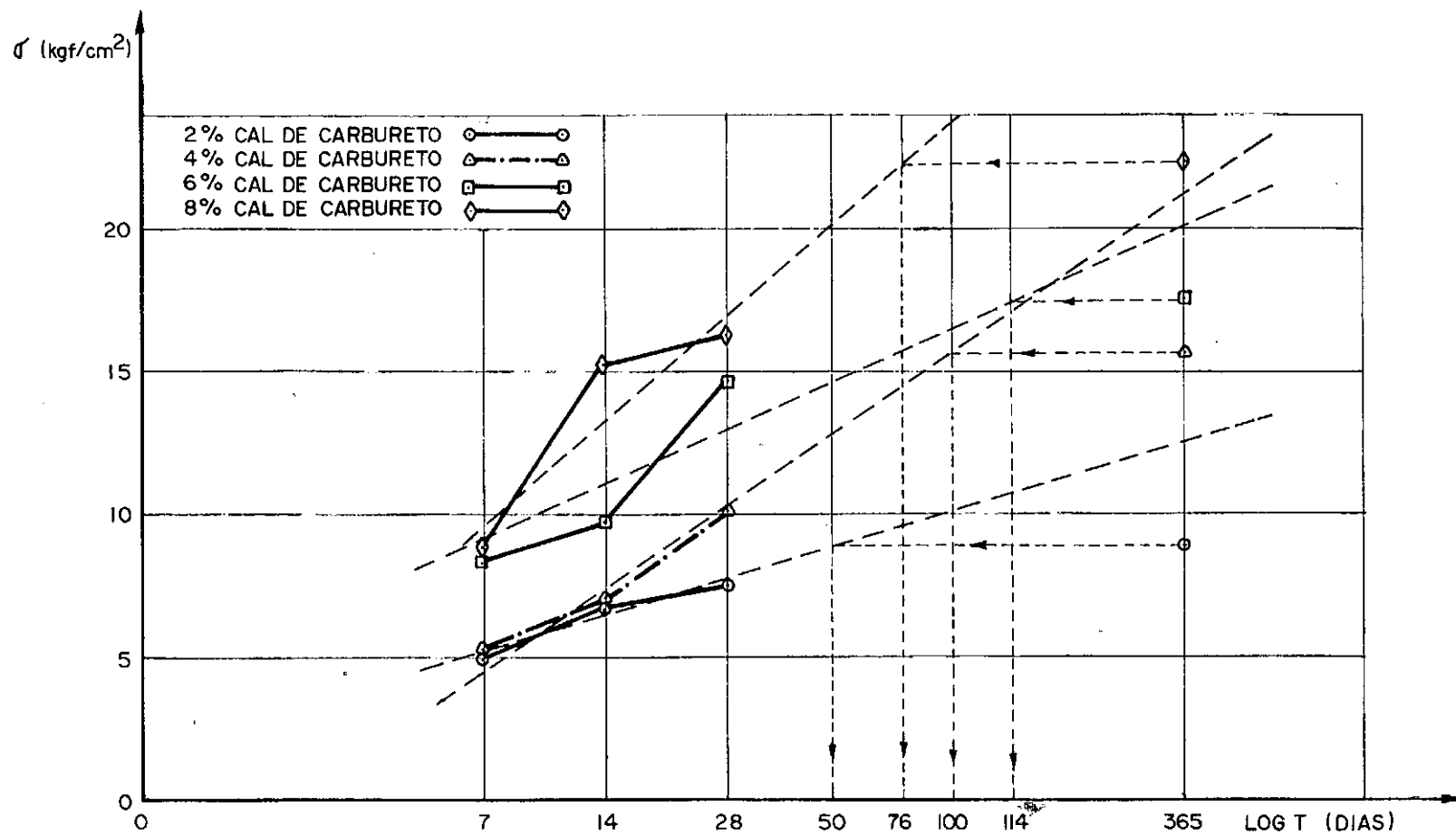


FIG. 12.4 — Resistência à compressão simples, solo - cal de carbureto

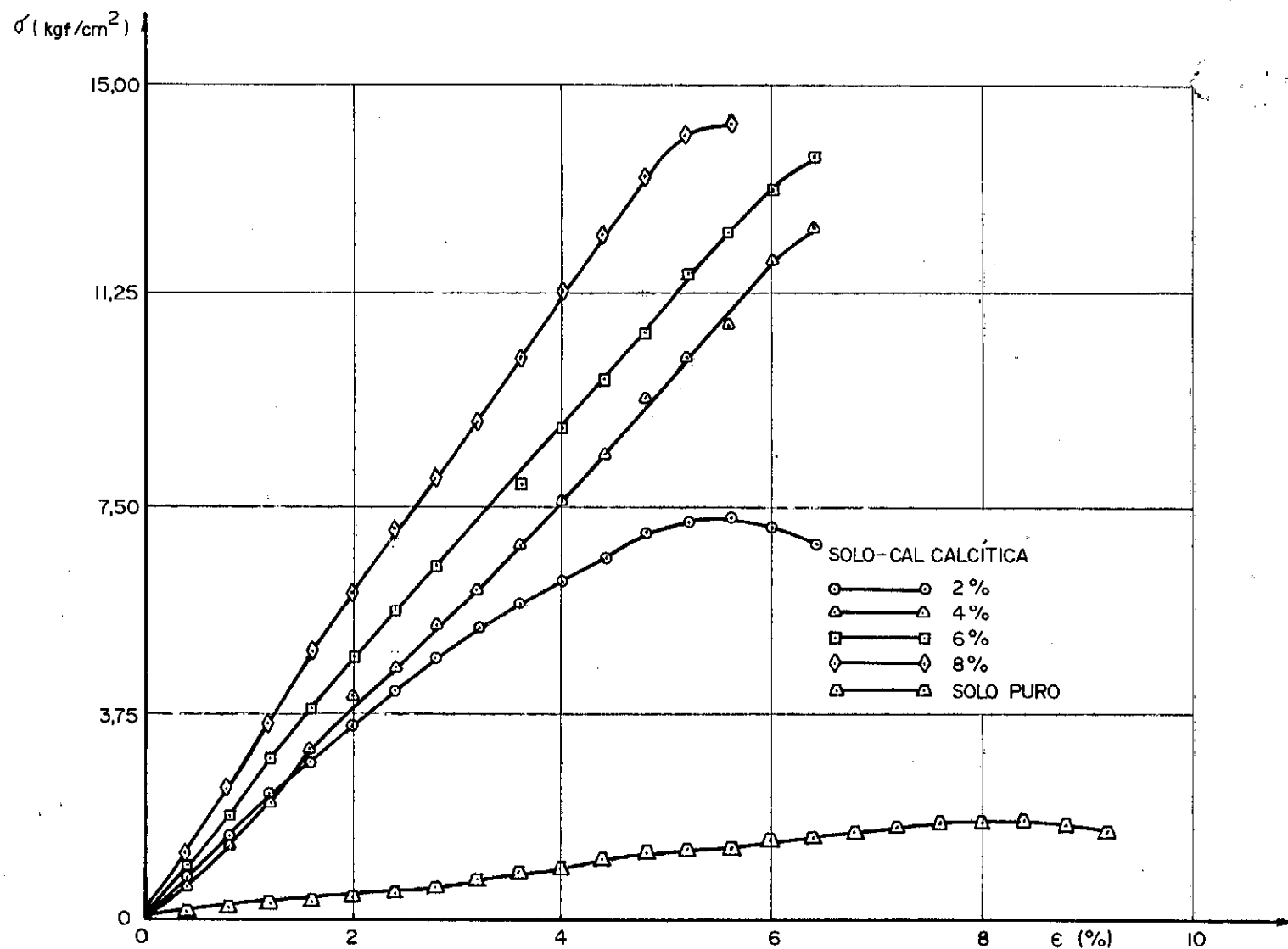


FIG.12.5 — Tensão versus deformação do solo-cal calcítica, no ensaio de resistência à compressão não confinada, a uma cura de 7 dias

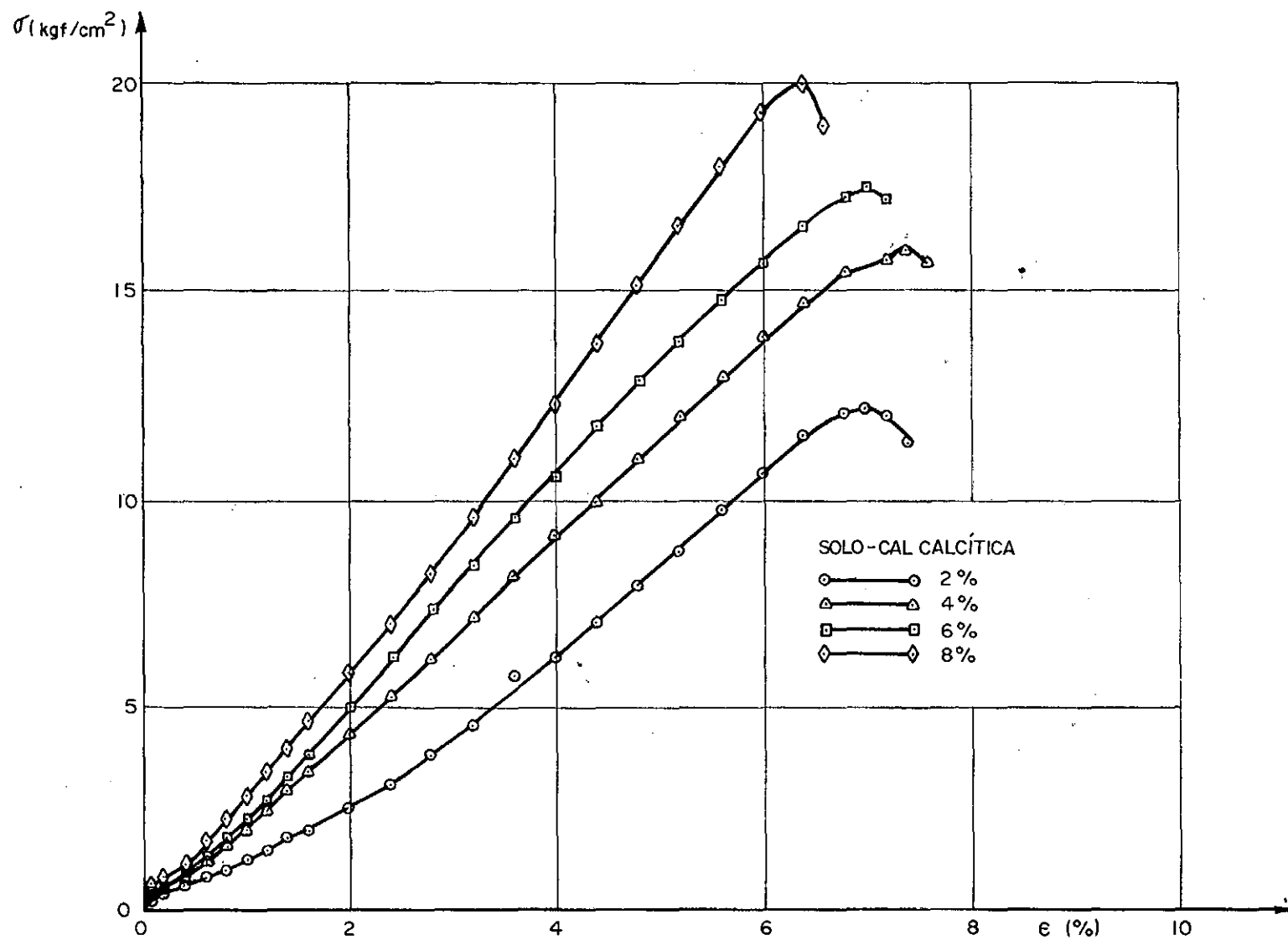


FIG.12.6 — Tensão versus deformação do solo-cal calcítica, no ensaio de resistência à compressão não confinada, a uma cura de 14 dias

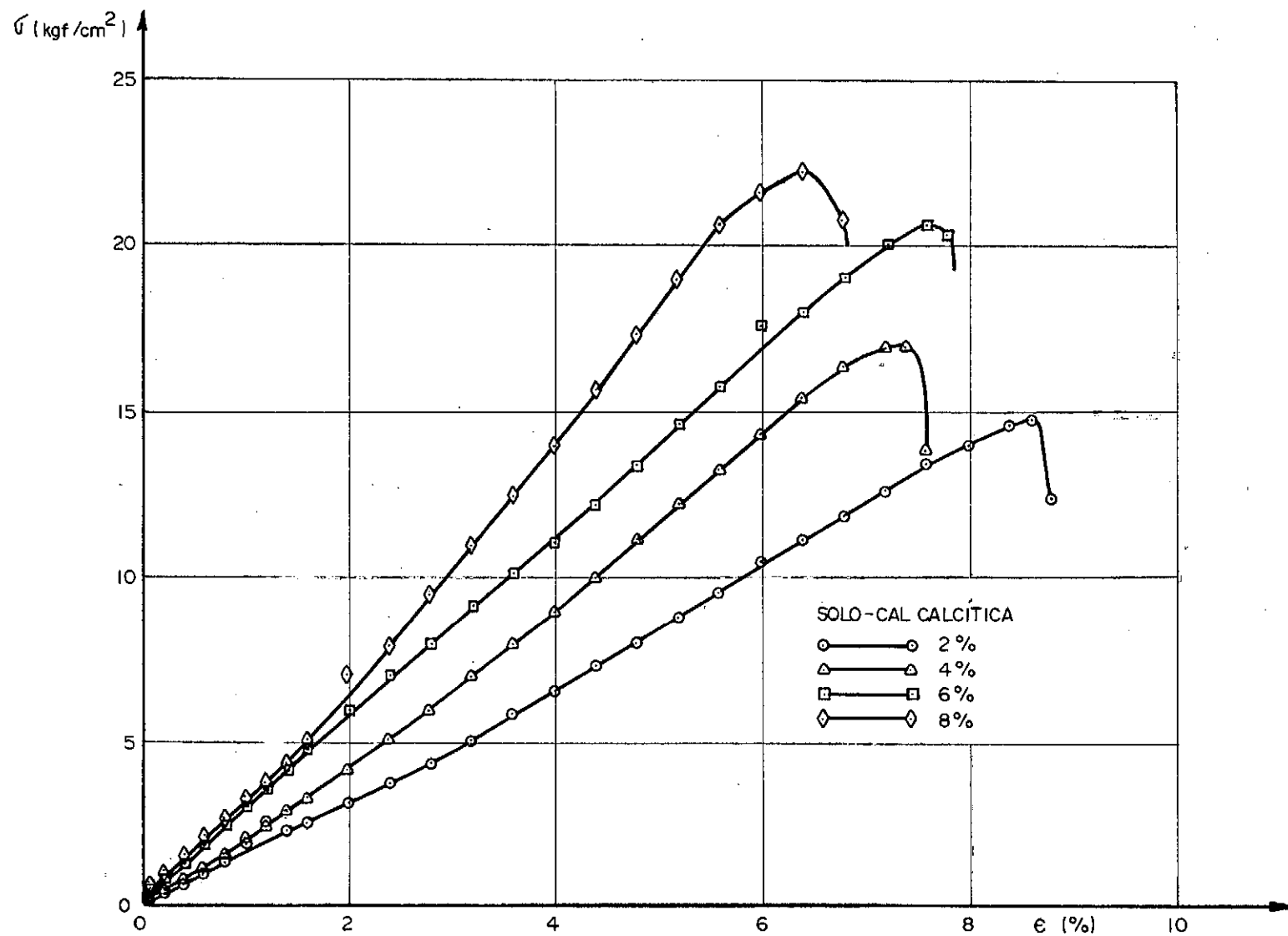


FIG.12.7 — Tensão versus deformação do solo-cal calcítica, no ensaio de resistência à compressão não confinada, a uma cura de 28 dias



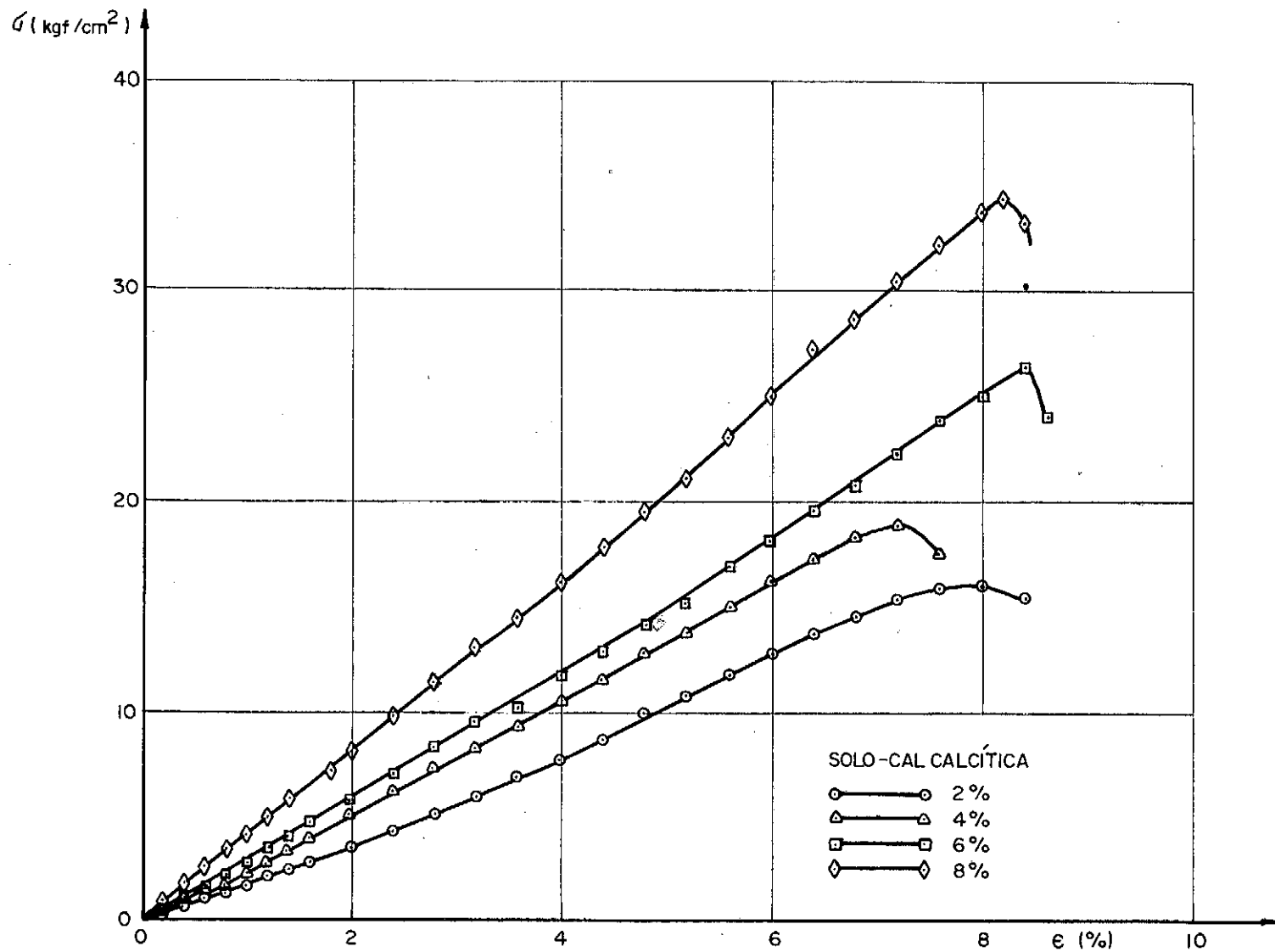


FIG.12.8 — Tensão versus deformação do solo-cal calcítica, no ensaio de resistência à compressão não confinada, a uma cura de 72 horas, a 60°C

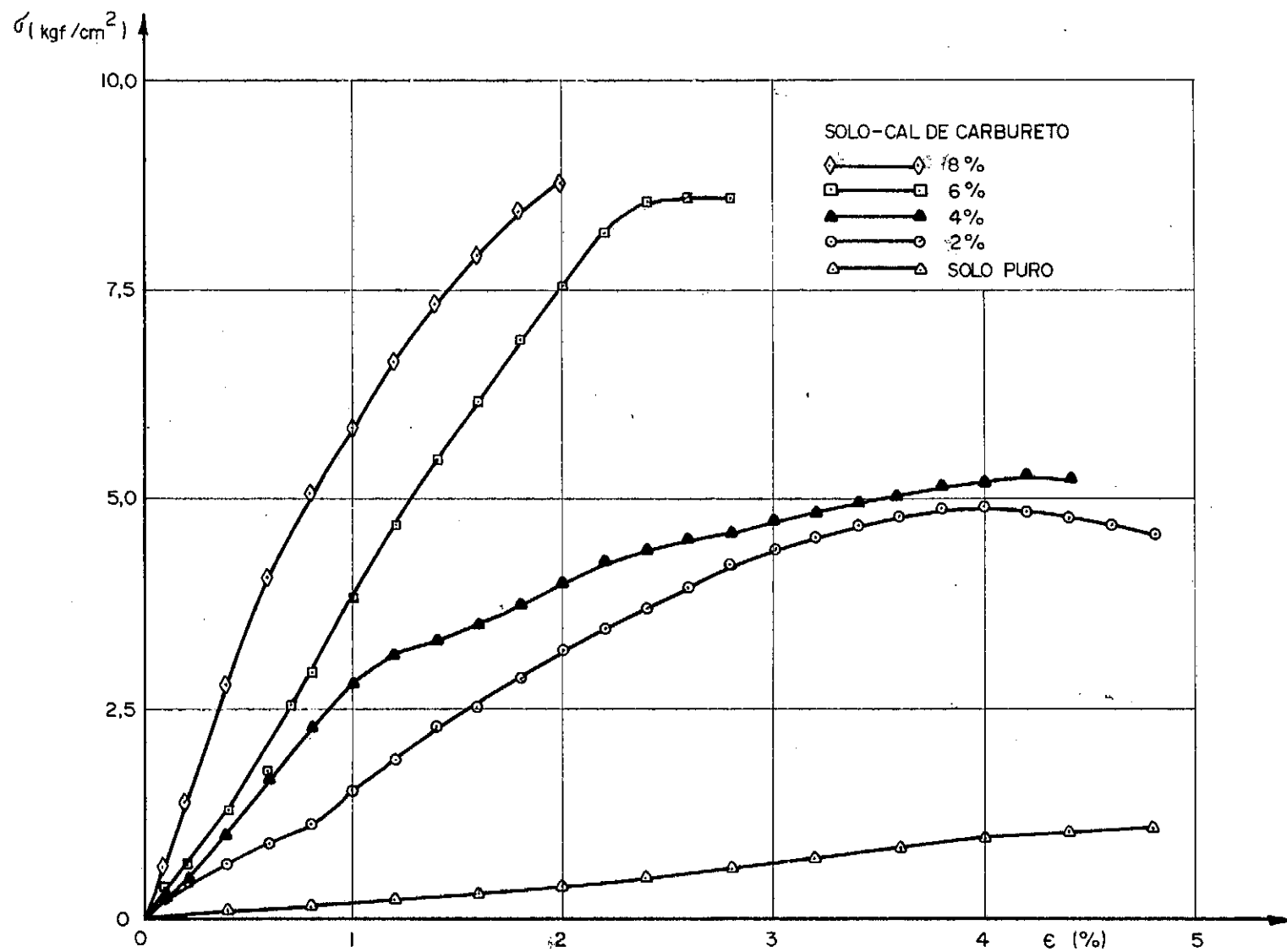


FIG.12.9 – Tensão versus deformação do solo-cal de carbureto, no ensaio de resistência à compressão não confinada a uma cura de 7 dias

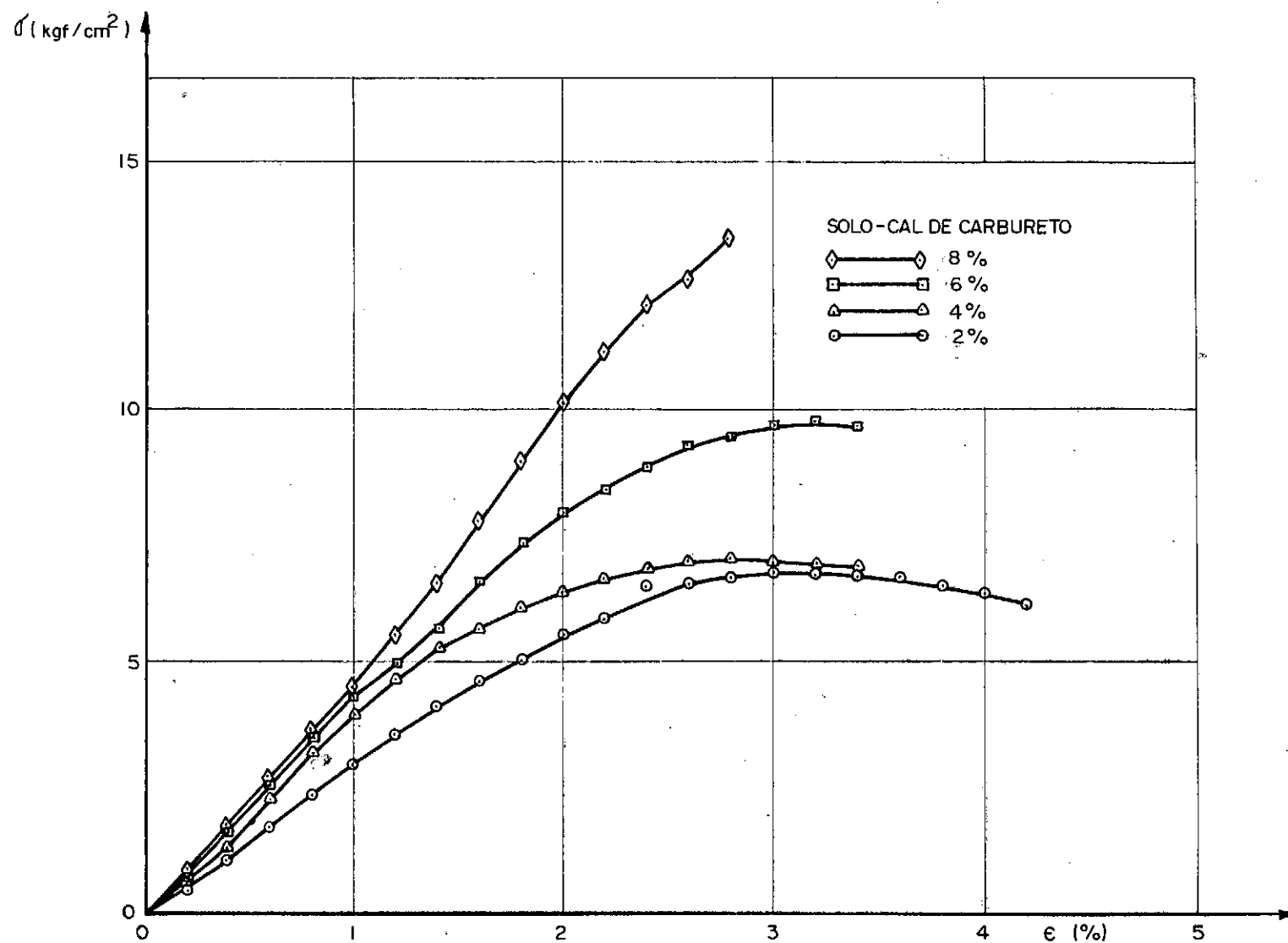


FIG.12.10 — Tensão versus deformação do solo-cal de carbureto, no ensaio de resistência à compressão não confinada a uma cura de 14 dias

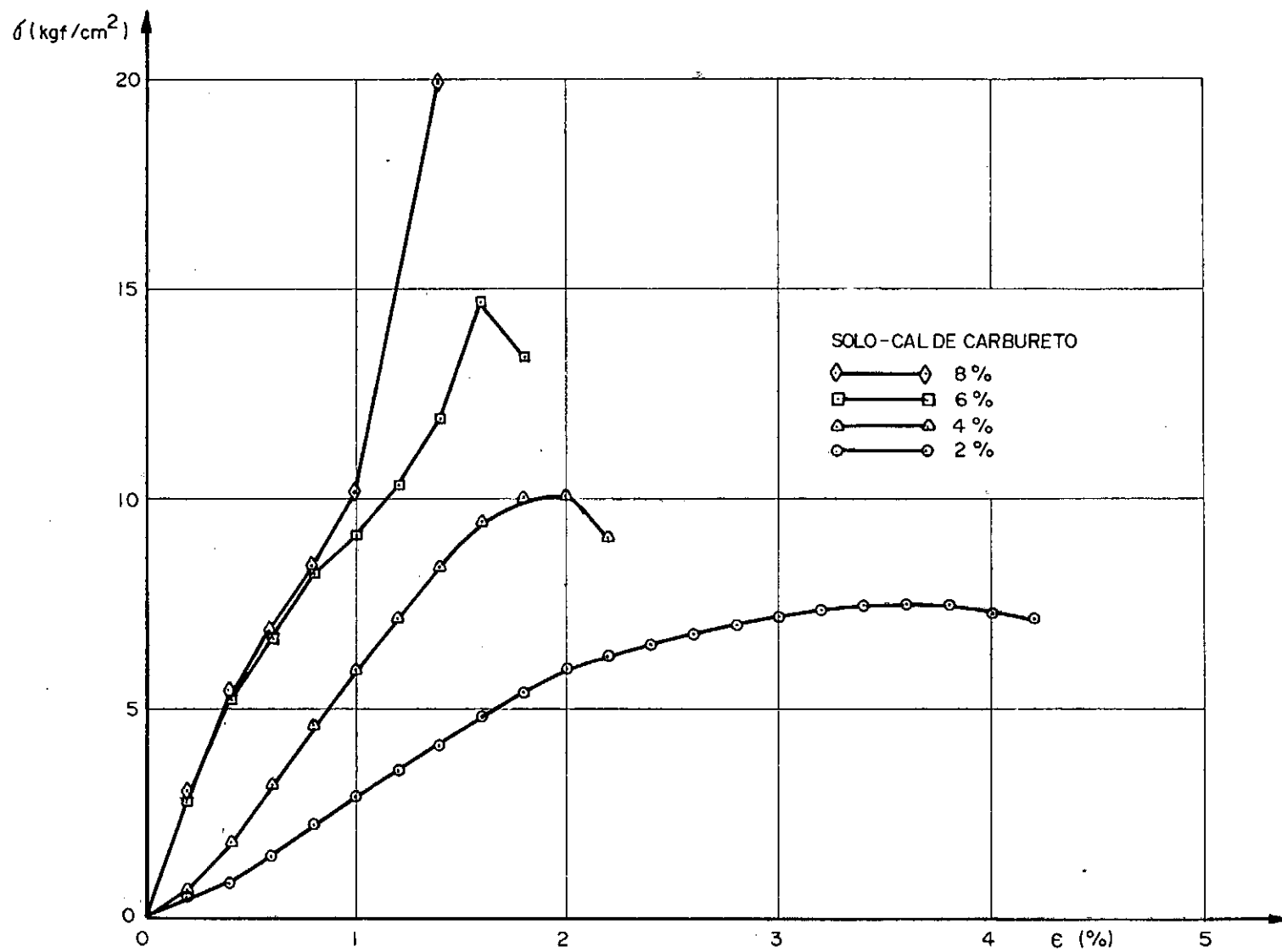


FIG.12.II — Tensão versus deformação do solo-cal de carbureto, no ensaio de resistência à compressão não confinada a uma cura de 28 dias

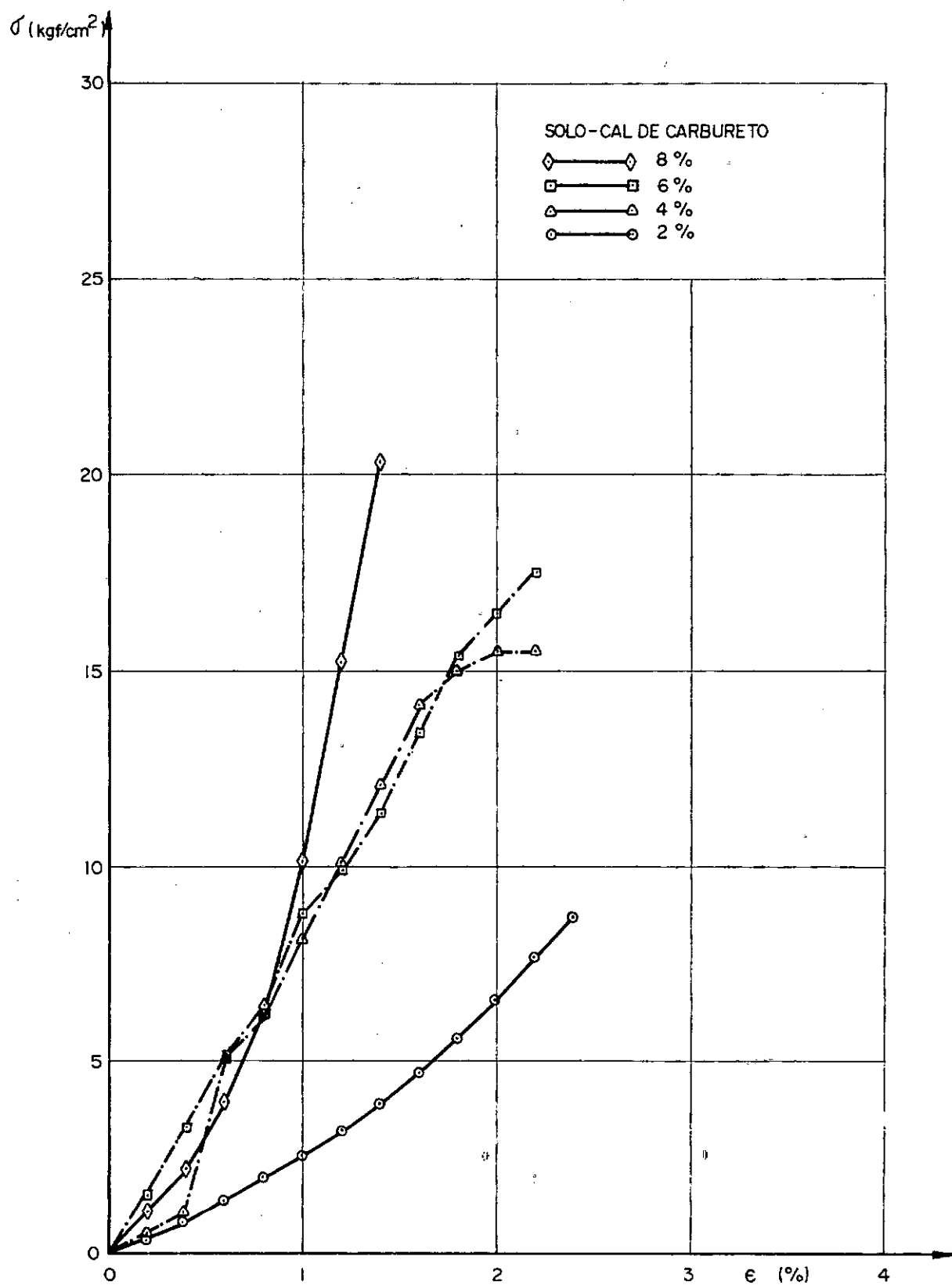


FIG.12.12 — Tensão versus deformação do solo-cal de carbureto, no ensaio de resistência à compressão não confinada a uma cura de 72 horas, a 60°C

TABELA 12.1 - Resistência à compressão não confinada para o solo-cal de carbureto, a diversas percentagens, em relação ao tempo de cura empregado.

TEMPO DE CURA + 3 DIAS DE IMERSÃO	PERCENTAGENS DE CAL CARBURETO			
	2	4	6	8
7 dias	4,90	5,33	8,60	8,80
14 dias	6,80	6,93	9,77	15,77
28 dias	7,50	10,02	14,69	19,28
3 dias a 60°C	8,90	15,98	17,53	22,83

TABELA 12.2 - Resistência à compressão não confinada para o solo-cal calcítica, a diversas percentagens, em relação ao tempo de cura empregado.

TEMPO DE CURA + 3 DIAS DE IMERSÃO	PERCENTAGENS DE CAL CALCÍTICA HIDRATADA			
	2	4	6	8
7 dias	7,26	12,63	13,70	14,26
14 dias	12,20	15,98	17,45	20,04
28 dias	14,84	17,05	20,68	22,33
3 dias a 60°C	16,08	18,98	26,43	34,12

### CONCLUSÃO

Verifica-se que a resistência à compressão não confinada cresce com o teor de cal usado, figuras 12.1 e 12.2, e estes acréscimos de resistência são maiores para o solo-cal calcítica do que para o solo-cal de carbureto, o que já era esperado, pois a primeira tem um maior teor de  $\text{Ca(OH)}_2$ , e é este composto que reagirá com a sílica e alumina da argila (28).

Como se pode verificar, nas figuras 12.3 e 12.4, a resistência à compressão cresce com o tempo de cura, e esse crescimento de resistência ocorre devido ao processamento das reações pozolânicas (19). Os pontos marcados, nos gráficos acima referidos, foram unidos por linhas retas, segundo o critério usado por Ingles e Metcalf (14).

De acordo com Eades e Grim (27), a resistência a uma cura de 72 horas a  $60^\circ\text{C}$ , corresponde a de um ano no campo, à temperatura ambiente, sendo que, para o solo em estudo e às temperaturas usadas, levando-se em consideração que a resistência cresce uniformemente com o tempo, estas diferenças entre os tempos de cura foram menores. Pode-se verificar ainda nos mesmos gráficos 12.3 e 12.4, que o tempo de cura correspondente ao de 72 horas, a  $60^\circ\text{C}$ , varia com o teor de cal, sendo que, maior o teor de cal usado, maior o tempo de cura correspondente.

Drake e Haliburton (9) encontraram diversos crescimentos de resistência para diferentes tipos de solo estabilizado.

Nas figuras 12.5 até 12.12, estão marcados os valores das resistências à compressão não confinada, em função da deformação específica para as duas cals usadas e para os tempos de cura de 3, 7, 14 e 28 dias, e com 3 dias em imersão, sendo evidente o aumento da resistência com o teor de cal, tempo de cura e temperatura, sendo esta última uma das vantagens do emprego da cal em regiões de clima quente. Observa-se, também, que o crescimento de resistência é maior para o solo-cal calcítica.

Verifica-se, ainda, que, para a mesma idade de cura, o módulo de Elasticidade cresce com a percentagem de cal, tendo maiores valores para o solo-cal calcítica.

As rupturas dos corpos-de-prova do solo-cal ocorreram praticamente sem deformação, em superfícies planas e rapidamente, aumentando estas características com o teor de cal e, para um mesmo teor, com o tempo de cura, naturalmente devido a um maior enrijecimento da mistura.

Os valores das resistências à compressão, para o solo-cal de carbureto e para o solo-cal calcítica, ambas a 2, 4, 6 e 8%, em relação ao peso do solo seco e para os diversos tempos de cura usados, encontram-se nas TAB. 12.1 e 12.2.



CAPÍTULO XIIIENSAIO DE COMPRESSÃO TRIAXIAL

Com a finalidade de se verificar a influência da cal de carbureto e da cal calcítica hidratada na coesão e atrito interno do solo em estudo, realizaram-se ensaios de compressão triaxial, adensados, não drenados, com medição de pressão neutra.

Foram moldados corpos-de-prova de solo puro, de solo-cal de carbureto e de solo-cal calcítica, ambas a uma proporção igual a 6%, em relação ao peso de solo seco, com dimensões iguais a 3,5 cm de diâmetro por 9,0 cm de altura, em cinco camadas pelo método Havard, sendo a energia de compactação adotada, equivalente ao do proctor normal ( $6 \text{ Kgf.cm/cm}^3$ ).

Em seguida, os corpos-de-prova eram deixados em câmara úmida, a uma temperatura igual a  $25^{\circ}\text{C} \pm$ , envoltos em papel alumínio, durante 7 dias.

Utilizando-se uma prensa Wikeham Farrance, de 10T de capacidade, iniciava-se a saturação do corpo-de-prova, aplicando-se subpressões, progressivamente, até que se conseguisse um valor do parâmetro  $\bar{B}$ , de pressão neutra, bem próximo a 1.

A partir de então, iniciava-se o adensamento do corpo-de-prova. Com os dados obtidos na medição do adensamento, traçava-se a curva correspondente à variação do volume versus

logarítmo do tempo decorrido, com a qual se calculava o tempo necessário para ser alcançada a ruptura, pelo método de Bishop e Henkel (29).

$$t_f = 5 \text{ a } 8 (t_{50})$$

Sendo,  $t_{50}$  obtido da curva do adensamento.

Considerando a deformação linear do corpo-de-prova, igual a 5%, calculamos a velocidade de aplicação da tensão desviatória, como

$$v = \frac{0,05 H}{t_f}$$

Sendo:  $t_f$  = tempo final do ensaio

$H$  = altura do corpo-de-prova

Foi adotada uma velocidade de aplicação da tensão, igual a 0,2 mm/min, por ser a mais próxima da calculada.

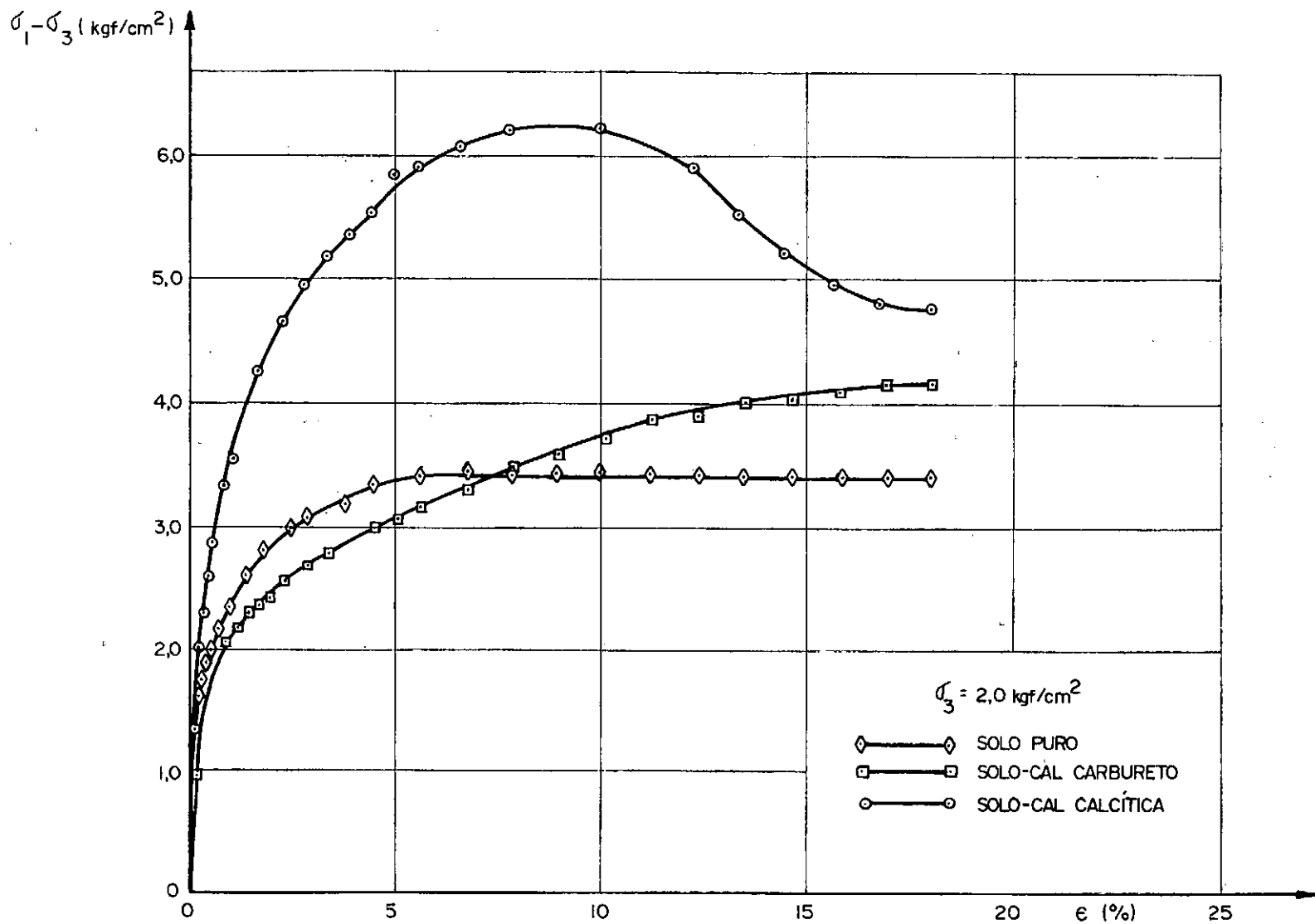


FIG.13.1 — Curvas tensão-deformação. Ensaio de compressão triaxial CU., para o solo puro, solo-cal de carbureto e solo-cal calcítica

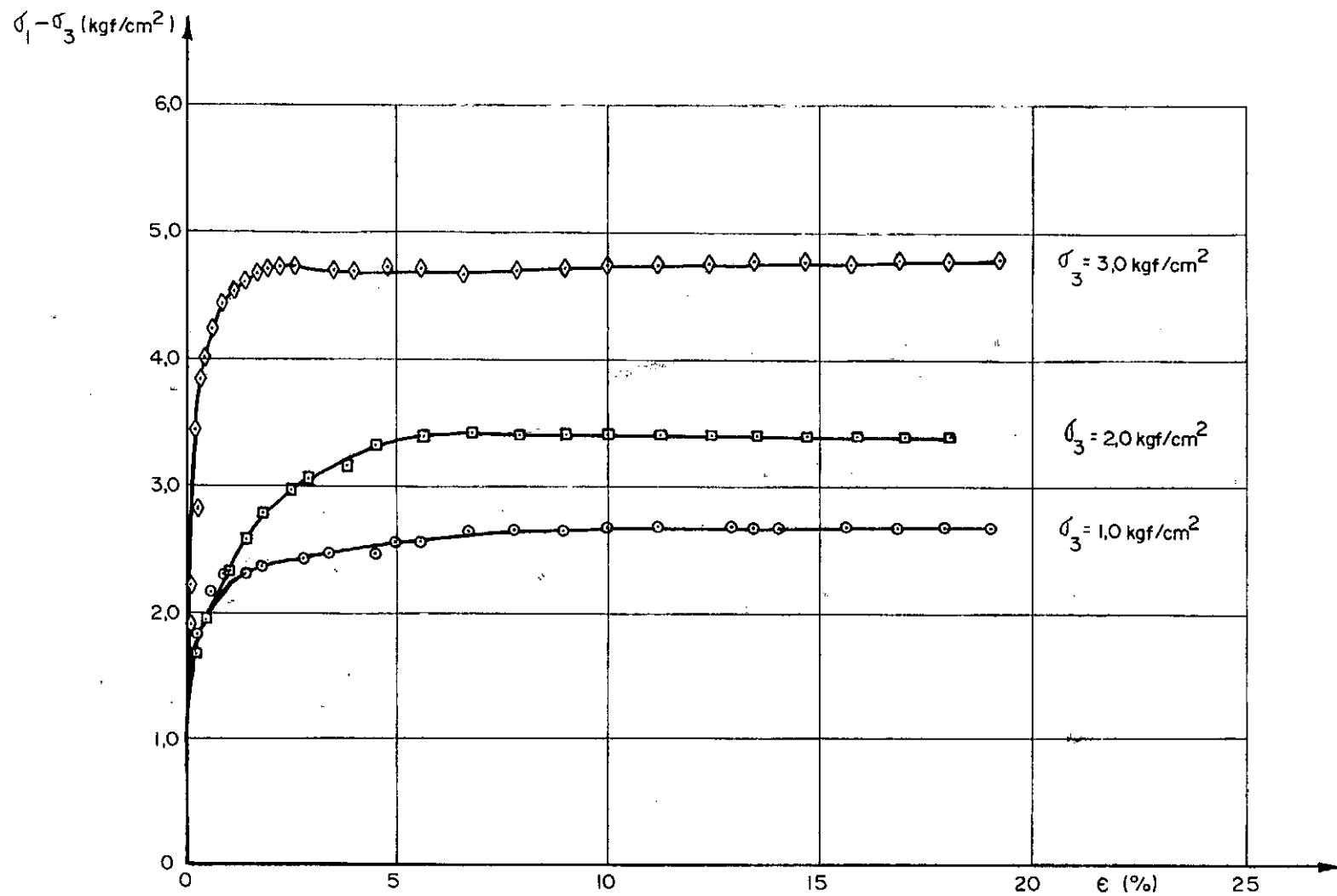


FIG.13.2 — Curvas tensão-deformação, para o solo puro, a tensões confinantes iguais a  $1,0 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $2,0 \text{ kgf/cm}^2$  e  $3,0 \text{ kgf/cm}^2$

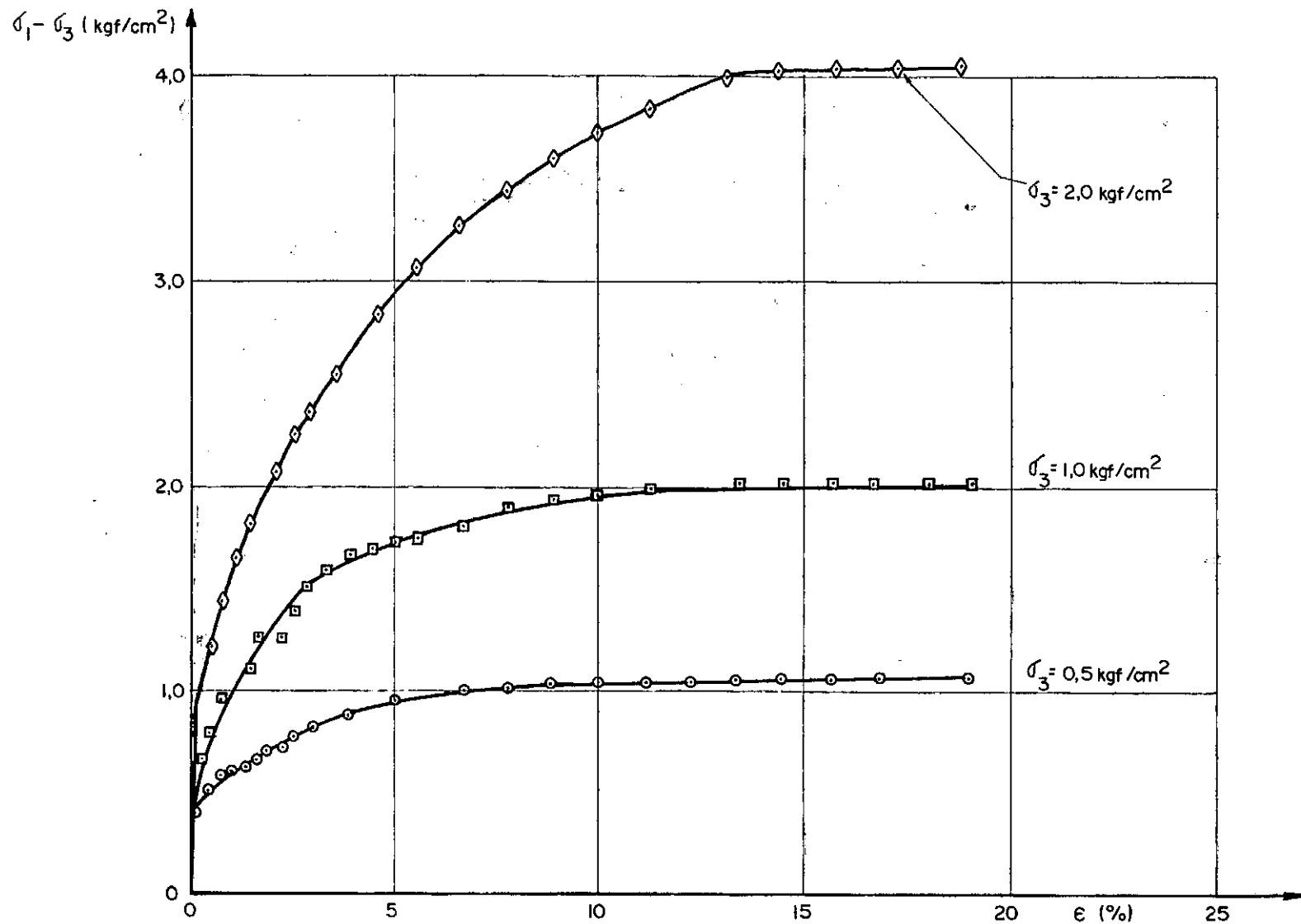


FIG.13.3 — Curvas tensão-deformação, para solo-cal de carbureto, a tensões confinantes iguais a 0,5  $\text{kgf/cm}^2$ , 1,0  $\text{kgf/cm}^2$  e 2,0  $\text{kgf/cm}^2$

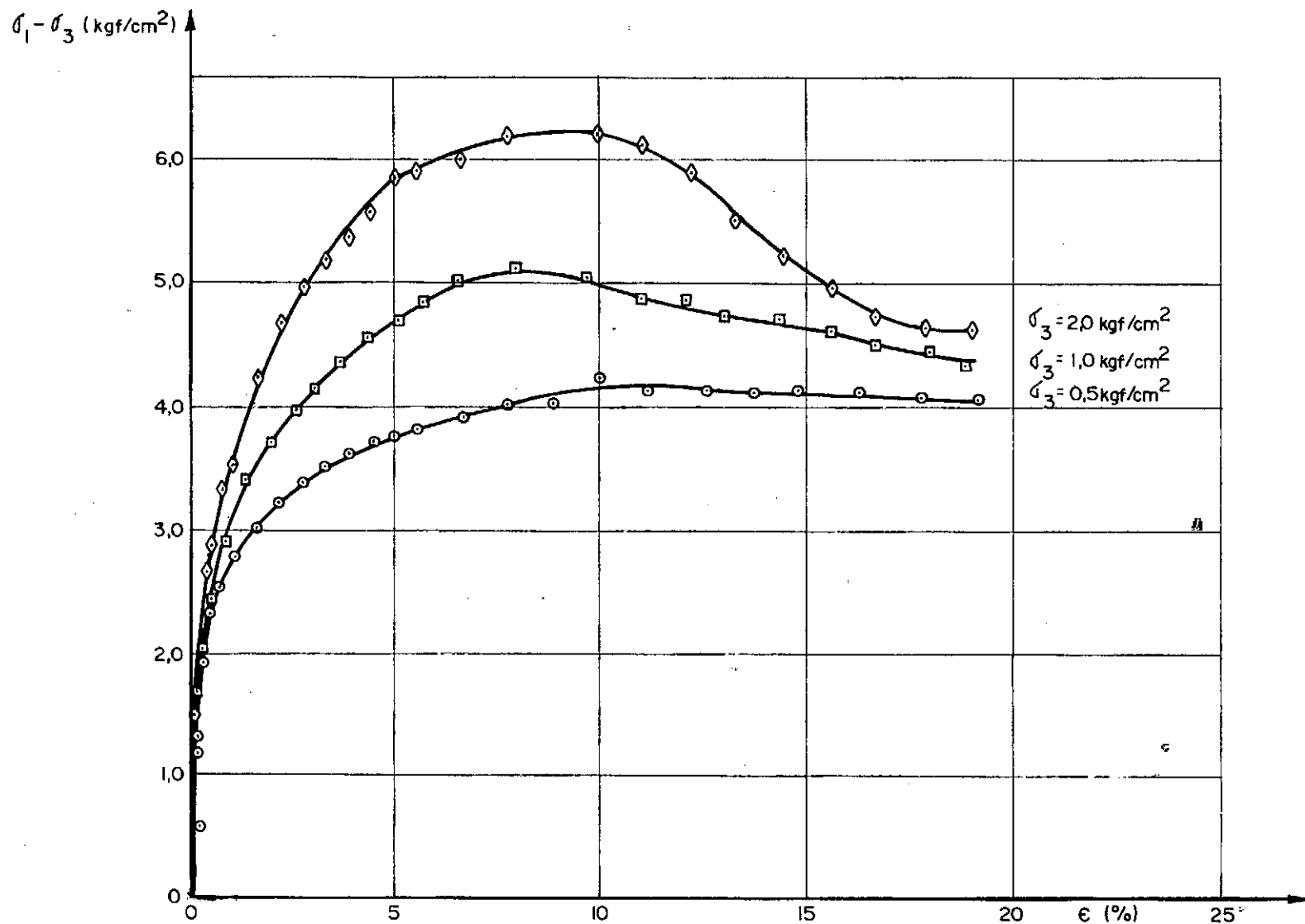


FIG. 13.4 — Curvas tensão-deformação, para solo-cal calcífica, a tensões confinante iguais a  $0.5 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $1.0 \text{ kgf/cm}^2$  e  $2.0 \text{ kgf/cm}^2$

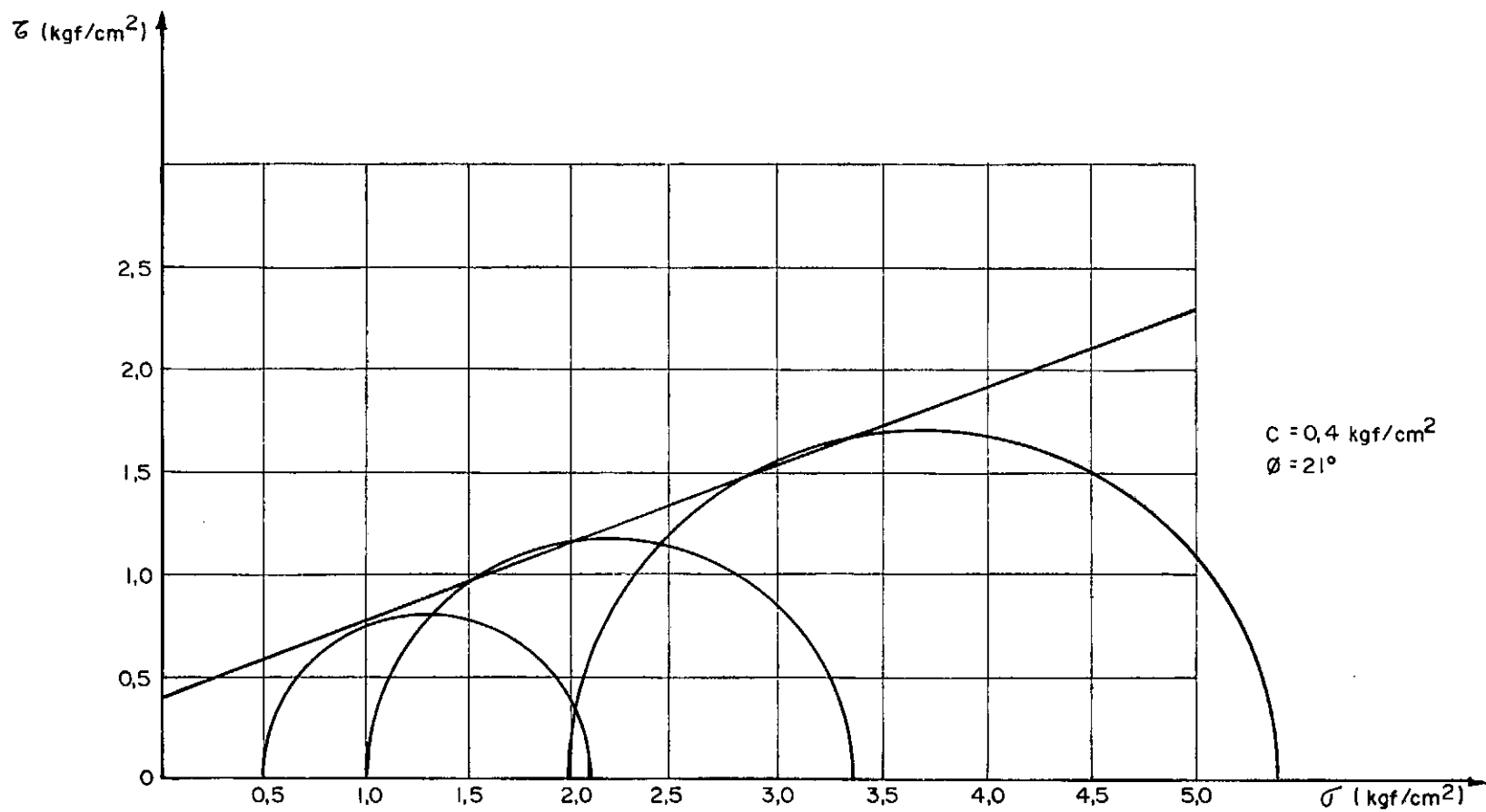


FIG. 13.5 — Envolvória de Mohr. Ensaio C.U. Pressões totais. Solo puro

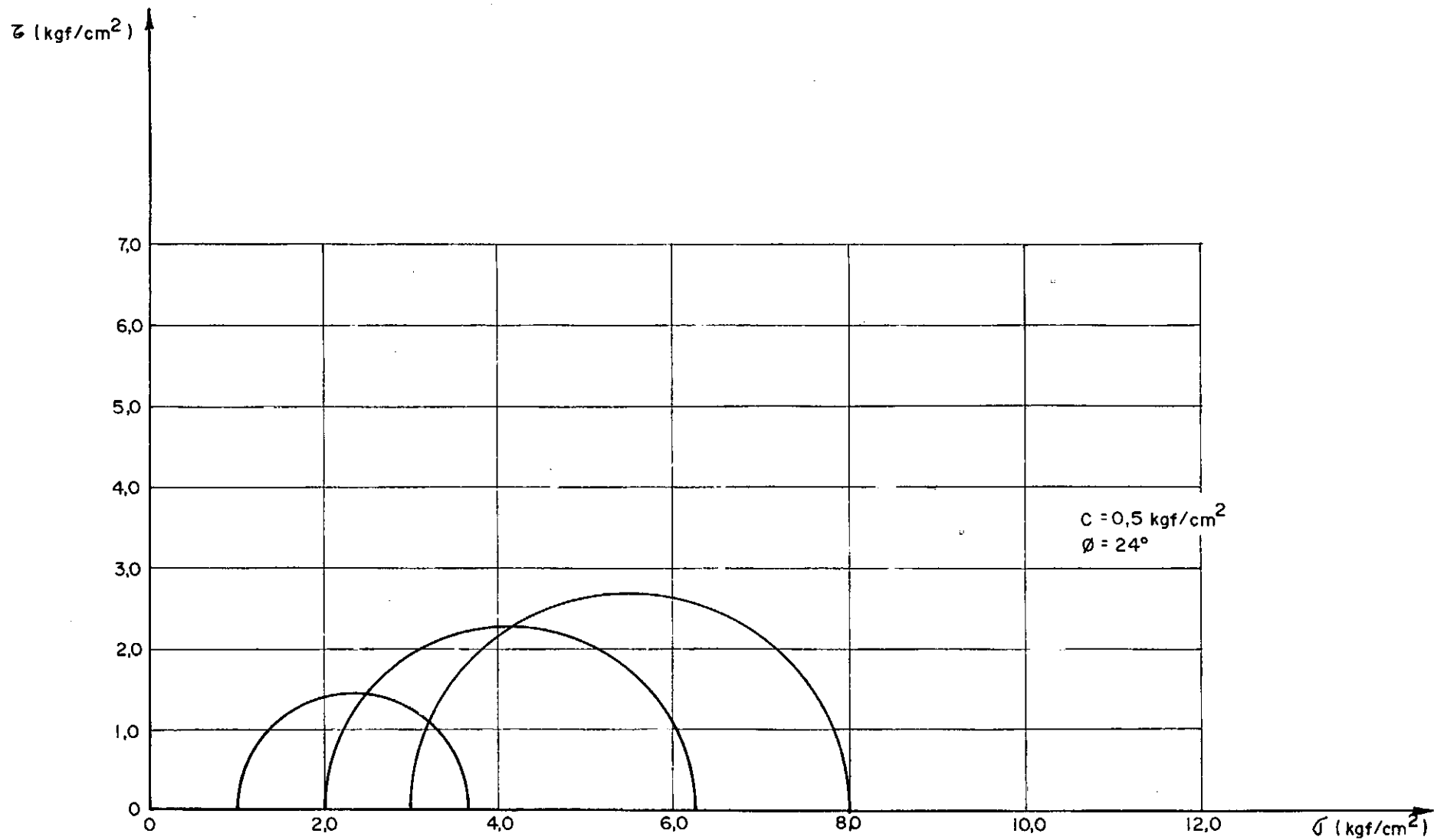


FIG. 13.6 — Envoltória de Mohr. Ensaio C.U. Pressões totais. Solo-cal, de carbureto



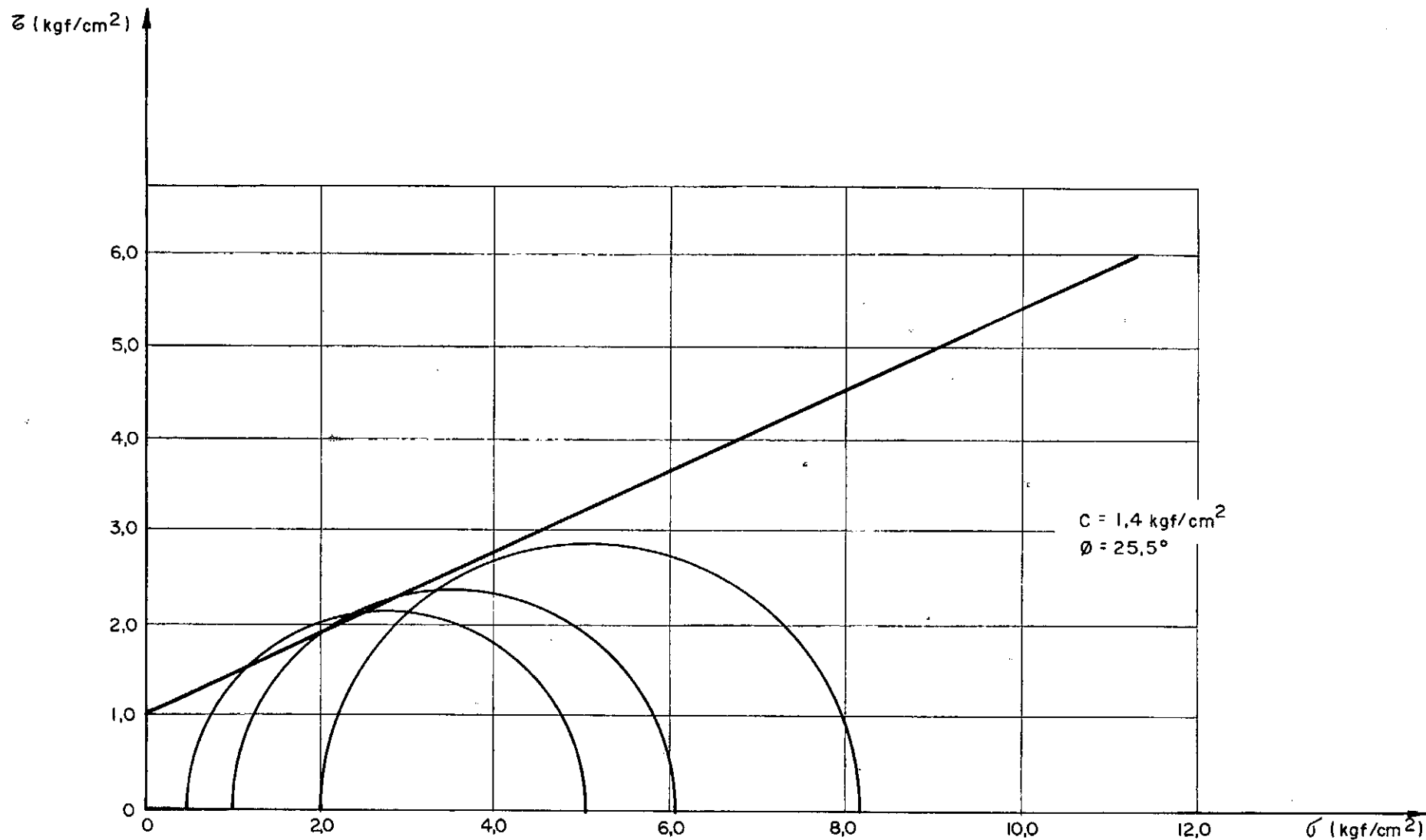


FIG. 13.7 — Envolvória de Mohr. Ensaio C.U. Pressões totais. Solo - cal calcítica

### CONCLUSÃO

Analisando-se os resultados marcados nas curvas tensão-deformação, a uma tensão confinante igual a  $2,0 \text{ Kg/cm}^2$ , para o solo puro, solo-cal de carbureto e solo-cal calcítica, figura 13.1, verifica-se que há um acréscimo de resistência à compressão triaxial igual a 85% para o solo-cal calcítica e igual a 15% para o solo-cal de carbureto. Esses acréscimos de resistência ocorrem devido a um aumento na coesão e no atrito interno do solo, como se pode observar nas figuras 13.5, 13.6 e 13.7.

A coesão do solo-cal de carbureto cresceu cerca de 25%, para 150% do solo-cal calcítica, enquanto os acréscimos do atrito interno foram de 14% e 26%, para as respectivas cais.

Nas figuras 13.2, 13.3 e 13.4, estão marcados os resultados obtidos para a tensão versus deformação, para o solo puro, solo-cal de carbureto e solo-cal calcítica, para as tensões confinantes iguais a  $0,5 \text{ Kg/cm}^2$ ,  $1,0 \text{ Kg/cm}^2$ ,  $2,0 \text{ Kg/cm}^2$  e  $3,0 \text{ Kg/cm}^2$ , usadas nos ensaios.

CAPÍTULO XIV

PROPRIEDADES DO SOLO-CAL DE CARBURETO E DO  
SOLO-CAL CALCÍLICA, NOS TEORES MÍNIMOS,  
PARA UMA ESTABILIZAÇÃO ÓTIMA

As tabelas 14.1 e 14.2 apresentam os valores encontrados para o índice de plasticidade, contração linear e volumétrica, expansibilidade, peso específico seco máximo e umidade ótima, índice de suporte califórnia e resistência à compressão simples, a diversos tempos de cura, para o solo calcílica, a 2%, em relação ao peso do solo seco, e solo-cal de carbureto, a 4%, teores mínimos, para uma estabilização ótima do solo, encontrados pelo método de Eades e Grim. Encontram-se, ainda, nas referidas tabelas, as variações percentuais para cada propriedade em relação aos valores encontrados para o solo puro.

Comparando-se os efeitos da cal de carbureto, a 4%, e da cal calcílica, a 2%, podemos verificar certa equivalência principalmente para a plasticidade, contração, expansibilidade e compactação. Sendo que para o índice de suporte califórnia, a variação percentual é aproximadamente 3 vezes maior para o solo-cal calcílica do que para o solo-cal de carbureto. Analisando-se, ainda, o efeito na resistência à compressão simples, TAB. 14.2, observa-se maiores acréscimos para o solo-cal calcílica.

Na TAB. 14.3 encontram-se os valores da coesão e atrito interno encontrados para o solo puro, solo-cal calcílica

tica e solo-cal de carbureto, ambas a um teor igual a 6%, assim como as variações percentuais em relação aos valores encontrados para o solo puro. Observa-se, então, maiores acréscimos para o solo-cal calcítica do que para o solo-cal de carbureto, sendo que, esses acréscimos são maiores para a coesão do que para o atrito interno.

TABELA 14.1 - Valores encontrados nos ensaios realizados com o solo puro, solo-cal de carbureto, a uma percentagem igual a 4%, e para o solo-cal calcítica, a 2%, e as variações percentuais em relação aos valores encontrados para o solo puro.

	SOLO PURO	SOLO-CAL DE CARBURETO		SOLO-CAL CALCÍTICA	
		VALORES	VARIAÇÃO PERCENTUAL	VALORES	VARIAÇÃO PERCENTUAL
ÍNDICE DE PASTICIDADE	26,6	21,0	21,0	21,2	20,3
CONTRAÇÃO LINEAR	13,0	7,5	42,3	7,5	42,3
CONTRAÇÃO VOLUMÉTRICA	25,0	34	36,0	35	36,0
EXPANSIBILIDADE	8,7	4,3	50,6	5,1	41,4
$\gamma_s$ MÁX. ( $\text{g/cm}^3$ )	1,6	1,49	6,3	1,52	5,0
UMIDADE ÓTIMA	21,0	25,5	21,4	24,5	16,7
CBR	9,0	15	66,7	27	200,0

TABELA 14.2 - Valores encontrados para a resistência à compressão simples do solo-cal de carbureto, a 4%, e do solo-cal calcítica, a 2%, e as variações percentuais em relação ao valor encontrado para o solo seco.

TEMPO DE CURA	SOLO-CAL CALCÍTICA A 2% VALORES (Kgf/cm <sup>2</sup> )	SOLO-CAL DE CARBURETO, A 4% VALORES (Kgf/cm <sup>2</sup> )
7 dias (25°C)	7,2	5,3
14 dias (25°C)	12,2	6,9
28 dias (25°C)	14,8	10,0
3 dias (a 60°C)	16,0	16,0

TABELA 14.3 - Valores encontrados para a coesão e ângulo de atrito interno, para o solo puro, solo-cal de carbureto e solo-cal calcítica ambas a um teor igual a 6%, e as variações percentuais em relação aos valores encontrados para o solo puro.

COMPRESSÃO TRIAXIAL C.U	SOLO PURO	SOLO-CAL DE CARBURETO		SOLO-CAL CALCÍTICA	
		VALORES	VARIÇÃO PERCENTUAL	VALORES	VARIÇÃO PERCENTUAL
Coesão (Kgf/cm <sup>2</sup> )	0,4	0,5	25	1,4	150
Ang.Atrito Int.	21°	24,0	14	25,5	21

BIBLIOGRAFIA

1. "Evaluation of Carbide Wastes" - Preliminary Report. National Lime Association. April 1, 1963.
2. HERZOG, A. e J.K. MITCHELL, "Reactions Accompanying Stabilization of Clay with Cement". Highway Research Record. Nº 36, Highway Research Board, 1973.
3. DIAMOND, S. e EARL B.K., "Mechanisms of Soil-Lime Stabilization , An Interpretive Review" Highway Research Record Nº 92, Highway Research Board, 1965.
4. EADES, J.L., "Reactions of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  with Clay Minerals in Soil Stabilization", Geology Department, University of Illinois, 1962.
5. EADES, J.L., e GRIM, R.E., "A Quick Test to Determine Lime Requirements for Lime Stabilization", H.R.R. 139, 1966.
6. NEUBANER, C.H. e TOMPSON, M.R., "Stability Properties of Uncured Lime Treated Fine Grained Soils", H.R.R. 381, Highway Research Board, 1972.
7. VAN GANSE, RENE F., "Immediate Amelioration of wet Cohesive Soils by Quicklime", Transportation Research Record 501, Transportagens Research Board, 1974.
8. MARK, B.D. e HALIBURTON, A.T. "Salt-Lime Stabilization",

School of Civil Eng., Oklahoma State University, Stillwater  
Firol Rept of Oklahoma Res. Proj. Agreements, June 1970.

9. DRAKE, A.J. e HALIBURTON, A.T., "Acelerated Curing of Salt-treated and Lime-Treated Cohesive Soils", H.R.R. 381, 1972.
10. NEWILL, D. "An Investigation of the Linear Shrinkage Test Applied to Tropical Soils, and its Relation to the Plasticity Index", Road Research Laboratory, Note Nº RN/4106/DN December, 1961.
11. LNEC - Ensaio de Expansibilidade, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal, E200, 1967.
12. CASTRO, E. "Estudos Relativos a Estabilização de Solos com Cal", II Simpósio de Pesquisa Rodoviária, Rio de Janeiro, 1966.
13. HOSKINS, E.R., HAMMERQUIST, D.W. e D. IRBY, "Investigation of Several Additives for Controlling the Expansion of Pierre Shale", Highway Research Board, Nº 38.
14. INGLES, O.G. e METCALF, J.B., "Soil Stabilization Principles and Practice", Butterworths, 1972.
15. LAMBE, T.W., e WHITMAN, R.V., "Soil Mechanics", Massachusetts Institute of Technology, 1969.
16. MENENDEZ G., J.J.J., "Suelos Expansivos Su Estabilization

con Cal", Tese de Mestrado, COPPE, 1973.

17. PINTO, C.S., "Equipamento Reduzido para Moldagem de Corpos-de-Prova de Solo Aditivo", Instituto de Pesquisa Rodoviária, 87-GTM-65-01, 1965.
18. PINTO, C.S. "Estudo de Solo-Cal com Solos Brasileiros", 1º Simpósio sobre Pesquisa Rodoviária, Rio de Janeiro, 1965.
19. MOH, Z.C., "Reaction of Soil Minerals with Cement and Chemicals", Highway Research Record Nº 86, Highway Research Board, 1965.
20. SLOANE, R.L., "Early Reaction Determination in Two Hydroxide-Kaolinite Systems by Electron Microscopy and Diffraction", Proceedings of the 13th Conference, New York, 1965.
21. THOMPSON, M.T., "Engeneering Properties of Lime-Soil Mixtures" Journal of Materials, Vol.4, Nº 4, American Society for Testing and Materials, December 1969.
22. HARTY, J.R. e THOMPSON, M.R., "Lime Reactivity of Tropical and Subtropical Soils", Highway Research Board, Nº 442, 1973.
23. HERKIN, M. e MITCHELL, H., "Lime-Soil Mixture", Highway Research Board, Bull. 304, 1961
24. FERRO, J.G.O., "A Influência da Cal nas Propriedades de Engenharia de Solos Lateríticos", Centro de Ciências de Tecno



logia, UFPb, Janeiro, 1976.

25. O'FLAHERTY, C.A. e ANDREWS, D.C., "Variations in Strength, Moisture Content and Unit Weight for Lime-Soil Mixtures". Civil Engineering and Public Works Review, 1967.
26. WANG, J.W.H., MATEOS, M. e DAVIDSON, D.T. "Comparative Effects of Hydraulic, Calcitic and Dolomitic Limes and Cement in Soil Stabilization", Highway Research Record, Nº 28, 1963.
27. EADES, J.L., NICHOLS, F.P. e GRIM, R.E., "Formation of New Minerals with Lime Stabilization as Proven by Field Experiments in Virginia", H.R.B. Bull 335, 1962.
28. EADES, J.L. e GRIM, R.E. "Reaction of Hidrated Lime with Pure Clay Minerals in Soils Stabilization", H.R.B., Bull 262, 1960.
29. BISHOP, A.W. e HENKEL, D.J., "The Triaxial Test", Willan Clowes and Sons, London, 1969.